

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

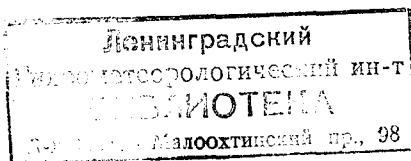
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ им. А. И. ВОЕЙКОВА

Т Р У Д Ы

ВЫПУСК 318

МОДЕЛИРОВАНИЕ
АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук Л. С. ГАНДИНА
канд. физ.-мат. наук Г. В. МЕНЖУЛИНА



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД • 1974

24-6332

Сборник содержит результаты исследований процессов, которые определяют метеорологический режим и продуктивность растительного покрова. Основное внимание уделено теоретическим и экспериментальным разработкам, проведенным с использованием методов физико-математического моделирования агрометеорологических явлений.

Рассчитан на специалистов, работающих в области физики приземного слоя атмосферы, агрометеорологии, биофизики растений.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Характерной чертой нынешнего этапа развития агрометеорологии является превращение ее из эмпирической, описательной в физико-математическую отрасль метеорологии. Это связано с общей тенденцией к математизации естественно-научных дисциплин. В применении к агрометеорологии это также вызвано требованием конкретизации теоретических построений и доведению их до расчетных физически обоснованных показателей.

В связи с отмеченной тенденцией сейчас можно говорить о двух направлениях в агрометеорологии, так или иначе ответственных за превращение ее в физико-математическую дисциплину. Первое из них основывается главным образом на применении приемов современной математической статистики. К работам этого направления относятся, в частности, исследования, ставящие своей целью построение статистических моделей прогноза урожайности. В этих моделях используются эмпирически выявленные корреляционные связи между урожаем конкретной сельскохозяйственной культуры и показателями, характеризующими климатические и погодные условия ее произрастания.

Конечно, разработка подобных схем прогноза урожаев не является единственной целью статистических исследований в агрометеорологии, тем не менее методы и исходные предпосылки, используемые в таких построениях, типичны для направления в целом.

Нельзя отрицать определенные положительные черты статистического подхода, в частности, к прогнозированию фазовой динамики развития агроценозов, их урожаев. К этим положительным чертам следует отнести простоту и однотипность статистических моделей, достаточную конкретность предсказуемых характеристик — предиктантов.

Однако, несмотря на эти положительные качества, статистические агрометеорологические построения не могут рассматриваться как единственно достаточные для расчета влияния комплекса факторов, воздействующих на агрометеорологические процессы. Это связано прежде всего с тем, что при помощи эмпирико-статистического подхода принципиально невозможно исследовать естественные физические закономерности агрометеорологических явлений, тогда как их исследование необходимо для самих же статистических построений. К примеру, выявление физических закономерностей наиболее значимых процессов, определяющих продуктивность, позволит сделать более объективным выбор предикторов в статистических моделях прогноза урожаев.

Вторая причина, по которой чисто статистические модели не могут быть полностью удовлетворительными, связана с многофакторным влиянием погодных, агрофизических и биологических условий на жизнедеятельность растений. Известно, что с увеличением числа вводимых в рассмотрение факторов, влияющих на некоторый процесс, количество используемых для построения статистической модели эмпирических данных, необходимых для установления корреляционных связей предикторов и предиктанта с заданной степенью достоверности, должно расти экспоненциально. Учитывая этот факт и то, что получение необходимой эмпирической информации в агрометеорологии связано с весьма значительными материальными и временными издержками, приходится признать, что чисто статистическое моделирование в агрометеорологии не является универсальным и перспективным.

Второе направление развивает непосредственно физико-математический подход к исследованию агрометеорологических процессов. Основной чертой этого подхода является использование закономерностей развитых естественных наук: физики, химии, биологии. Развитие этого направления неизбежно превращает агрометеорологию в прикладную отрасль фундаментальных естественных дисциплин. Такую тенденцию следует приветствовать по той причине, что разработка агрометеорологических проблем вряд ли может быть успешной без учета физических, биохимических и физиологических законов жизнедеятельности растений. Это направление делает агрометеорологию не только математизированной, но и обеспечивает ее естественную связь с прикладными дисциплинами.

Основной целью любых агрометеорологических исследований является изучение количественных характеристик влияния условий окружения на продуктивность растений, которая сама есть результат биологического процесса — синтеза комплекса высокомолекулярных органических соединений конкретного вида и структуры. Ход реакций биосинтеза зависит от скорости поступления исходных компонентов — субстратов — к биологически активным центрам в растениях. Исходными субстратами, поглощаемыми растениями из внешней среды, являются углекислый газ, вода, фотосинтетически активная радиация и элементы минерального питания. Чтобы исходить из значений концентраций субстратов вне пределов растительного сообщества, необходимо выявить закономерности их диффузии в пространстве, занятом фитоценозом. Так, изучение прохождения углекислого газа и фотосинтетически активной радиации из свободной от растений атмосферы к листьям неизбежно требует моделирования комплекса процессов, формирующих метеорологический режим межлистного пространства. Буквально то же следует сказать и о водном и солевом режиме корнеобитаемого слоя почвы, снабжающего растения водой и элементами минерального питания.

В настоящей серии статей будет рассмотрен теоретический подход к физико-математическому моделированию режима среды обитания растений и обсуждены выявленные методом численных экспериментов закономерности агрометеорологического режима.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Условимся считать, что растительность, метеорологическим режимом которой мы интересуемся, представляет собой горизонтально однородный покров высотой H . Предположение о горизонтальной однородности не должно ограничить общность приведенных ниже построений, так как большинство агрометеорологических объектов — поля сельскохозяйственных культур — с большой степенью точности удовлетворяют условию горизонтальной однородности.

В дальнейшем пространство, занимаемое воздухом в слое растительного покрова, мы будем называть межлистным, понимая под этим объемы, не включающие в себя пограничные слои на фитоэлементах, где метеорологические характеристики, такие, как скорость, температура, влажность, испытывают изменения, много более быстрые, чем вдали от этих слоев, т. е. в межлистном пространстве. Такое определение отчасти аналогично разделению толщи атмосферы на планетарный пограничный слой и свободную атмосферу.

При построении модели режима метеорологических элементов в межлистном пространстве необходимо рассмотреть следующие механизмы, его формирующие:

1) изменение геометрической структуры растительности, вызванное динамическим взаимодействием фитоэлементов с потоком воздуха в межлистном пространстве;

2) диссипацию среднего импульса воздушного потока, динамическую и термическую турбулизацию воздуха межлистного пространства; ограничение масштаба вихревых образований в растительности;

3) теплообмен и парообмен фитоэлементов с воздухом межлистного пространства;

4) закономерности энергетического баланса фитоценоза; режим коротковолновой и тепловой радиации в растительном покрове.

Естественно, что моделирование жизнедеятельности фитоценозов неизбежно требует и изучения водного и солевого режима корнеобитаемого слоя почвы. Про процессы диффузии влаги и солей в почве известно то, что характерное время установления равновесных распределений влажности и концентрации солей гораздо

больше, чем любой из метеорологических характеристик. По этой причине при построении моделей метеорологического режима в межлистном пространстве следует ограничиться рассмотрением квазистационарного случая, когда возможно параметрическое исследование нестационарности, связанной с изменением физиологических и погодных факторов.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- a — эмпирическая константа,
- B — кондуктивный поток тепла в почву,
- b — интенсивность турбулентности,
- $c = 21,7$ — константа,
- c_w — коэффициент аэродинамического сопротивления листа,
- c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении,
- $D_T^{\uparrow \text{sun}}$ — интегральный коэффициент температуропроводности для верхней поверхности листа, расположенного в солнечном пятне,
- $D_T^{\downarrow \text{sun}}$ — то же для нижней поверхности такого листа,
- $D_T^{\uparrow \text{shad}}$ — то же для верхней поверхности листа, расположенного в тени,
- $D_T^{\downarrow \text{shad}}$ — то же для нижней поверхности такого листа,
- D_T — осредненный по поверхности листа интегральный коэффициент температуропроводности,
- $D_T^{s, \text{sun}}$ — интегральный коэффициент температуропроводности для участка поверхности почвы, расположенного в солнечном пятне,
- $D_T^{s, \text{shad}}$ — то же для участка поверхности почвы, расположенного в тени,
- $D_q^{\uparrow \text{sun}}$ — интегральный коэффициент влагообмена верхней поверхности листа, расположенного в солнечном пятне,
- $D_q^{\downarrow \text{sun}}$ — то же для нижней поверхности такого листа,
- $D_q^{\uparrow \text{shad}}$ — то же для верхней поверхности листа, расположенного в тени,
- $D_q^{\downarrow \text{shad}}$ — то же для нижней поверхности такого листа,
- D_q — осредненный по поверхности листа интегральный коэффициент влагообмена,
- $D_q^{s, \text{sun}}$ — интегральный коэффициент влагообмена для участка поверхности почвы, расположенного в солнечном пятне,
- $D_q^{s, \text{shad}}$ — то же для участка поверхности почвы, расположенного в тени,
- D — коэффициент проводимости эпидермиса листа, содержащего устьица,
- d — эмпирическая константа (дисперсность растительности),
- e_s — модуль Юнга стебля,
- e_w — модуль упругости черенка листа,
- Gr — число Грасгофа,
- g — ускорение силы тяжести,
- H — длина стебля растения,
- h — толщина листа,
- $I_{\uparrow}$ — восходящий поток тепловой радиации в растительном покрове,
- $I_{\downarrow}$ — нисходящий поток тепловой радиации в растительном покрове,
- i, j, k — орты в направлении координатных осей x, y, z ,
- k — коэффициент турбулентной вязкости,

- L — теплота парообразования для воды,
- l — масштаб турбулентности,
- m_s — удельное количество стеблей (число стеблей на единице поверхности почвы),
- m_w — удельное количество листьев (число листьев в единице объема растительного покрова),
- Nu — число Нуссельта,
- Nu_{forced} — то же для вынужденной конвекции,
- Nu_{free} — то же для свободной конвекции,
- Pr — число Прандтля (для воздуха $Pr=0,65$),
- p — доля солнечных пятен в растительном покрове,
- q — влажность воздуха,
- q_{up} — влажность воздуха над растительным покровом,
- $q^{\uparrow}_{\text{sun}}$ — эквивалентная влажность верхней поверхности листа, расположенного в солнечном пятне,
- $q^{\downarrow}_{\text{sun}}$ — то же для нижней поверхности такого листа,
- $q^{\uparrow}_{\text{shad}}$ — то же для верхней поверхности листа, расположенного в тени,
- $q^{\downarrow}_{\text{shad}}$ — то же для нижней поверхности такого листа,
- q_w — влажность в воздушных межклеточниках листа,
- q_s^{sun} — эквивалентная влажность в верхнем слое участка почвы, расположенного в солнечном пятне,
- q_s^{shad} — то же для участка, расположенного в тени,
- q_s — осредненная по площади почвы эквивалентная влажность в ее верхнем слое,
- $R_{\uparrow}$ — восходящий поток коротковолновой рассеянной радиации,
- $R_{\downarrow}$ — нисходящий поток коротковолновой рассеянной радиации,
- $\bar{R}$ — суммарный коротковолновый радиационный баланс,
- R_{up} — то же над растительным покровом,
- Re — число Рейнольдса,
- r_s — радиус стебля,
- r_w — характерная полуширина листа,
- $s = is_x + js_y + ks_z$ — вектор удельной деятельности поверхности растительности,
- s_0 — то же при $u=0$,
- s — абсолютная величина листовой поверхности,
- $S_{\odot}$ — вектор прямой солнечной радиации,
- Sc_q — число Шмидта для водяного пара,
- T — температура воздуха,
- T_{up} — температура воздуха над растительным покровом,
- $T^{\uparrow}_{\text{sun}}$ — температура верхней поверхности листа, расположенного в солнечном пятне,
- $T^{\downarrow}_{\text{sun}}$ — то же для нижней поверхности такого листа,
- $T^{\uparrow}_{\text{shad}}$ — то же для верхней поверхности листа, расположенного в тени,
- $T^{\downarrow}_{\text{shad}}$ — то же для нижней поверхности такого листа,
- T_w — осредненная по площади листа температура его поверхности,
- T_s^{sun} — температура участка поверхности почвы, расположенного в солнечном пятне,
- T_s^{shad} — то же для участка, расположенного в тени,
- T_s — осредненная по площади температура поверхности почвы,
- t — косинус угла отгиба стебля от недеформированного состояния,
- u — скорость ветра,
- u_* — скорость трения (динамическая скорость),
- $\bar{V}$ — объем в слое растительного покрова,

- v — объем в пограничном слое на листе,
 x, y, z — направления декартовой системы координат,
 $\alpha_T, \alpha_q, \alpha_b$ — обратные турбулентные числа Шмидта для тепла, водяного пара и энергии турбулентности,
 β — коэффициент термического расширения воздуха,
 Γ_T — поток тепла в межлистном пространстве,
 Γ_q — поток водяного пара в межлистном пространстве,
 $\Gamma_q^{\text{sun}} (\lambda_0)$ — испарение с участка поверхности почвы, расположенного в солнечном пятне,
 $\Gamma_q^{\text{shad}} (\lambda_0)$ — то же для участка поверхности почвы, расположенного в тени,
 γ_w^{short} — коэффициент поглощения коротковолновой радиации листьями,
 γ_s^{short} — то же для поверхности почвы,
 γ_w^{long} — коэффициент поглощения тепловой радиации листьями,
 γ_s^{long} — то же для поверхности почвы,
 $\Delta_u, \Delta_T, \Delta_q, \Delta_d$ — эмпирические параметры (объяснение в тексте),
 δ_s — коэффициент «серости» почвы,
 δ_w — то же для поверхности листьев,
 z — константа Кармана,
 λ — координата вдоль стебля растений,
 λ_0 — параметр шероховатости поверхности почвы,
 λ_{air} — коэффициент молекулярной теплопроводности воздуха,
 λ_w — коэффициент теплопроводности биомассы,
 ν_{air} — кинематическая вязкость воздуха,
 π_w — параметр формы листа,
 ρ — вектор черенка листа,
 ρ_{air} — плотность воздуха,
 Σ — площадь на поверхности листа,
 σ — константа Стефана,
 χ_q — коэффициент молекулярной диффузии водяного пара в воздухе.

1. На первый взгляд может показаться, что исследование влияния ветра на структуру растительности имеет лишь познавательную направленность. Однако это не так. Здесь мы, к примеру, укажем на очевидное влияние изменений в ориентации листьев под действием ветра на распространение солнечной радиации в растительном покрове, которая является главным фактором, формирующим его метеорологический режим. Из дальнейшего же изложения станет ясно, что изменения в фитометрии могут заметно влиять и на другие характеристики метеорологического режима межлистного пространства.

Выявить изменения геометрической структуры растительности, происходящие под действием ветра, практически невозможно, так или иначе не схематизируя архитектуру реальных растений. Думается, что на первых этапах моделирования фитомеханических явлений можно ограничиться рассмотрением модельного фитоценоза, состоящего из растений, имеющих стебель переменного по своей длине λ радиуса r_s , содержащий некоторое количество листьев, некоторым образом расположенных на стебле. Густоту и ориентацию фитоэлементов в таком ценозе будем характеризовать,

как принято в фитометрии, вектором $\mathbf{s}$, равным по величине удельной листовой поверхности и направленным по нормали к поверхности фитоэлемента, например листа.

Введем правую декартову систему координат в растительном покрове, ось x которой направим навстречу ветру; z — перпендикулярна поверхности почвы. В дальнейшем эту систему будем называть основной.

Для решения задачи о движении листьев нашего модельного фитоценоза под действием ветра положение каждого листа можно описать двумя векторами — вектором удельной листовой поверхности $\mathbf{s}(\lambda) = i s_x(\lambda) + j s_y(\lambda) + k s_z(\lambda)$ и вектором, направленным к центру давления листа от точки прикрепления черенка листа к стеблю, $\mathbf{p}(\lambda) = i p_x(\lambda) + j p_y(\lambda) + k p_z(\lambda)$. В случае недеформируемых листьев эти векторы ортогональны. Считаем, что деформация черенка при повороте листа под ветром происходит без кручения, т. е. что угол между плоскостью, образованной векторами $\mathbf{i}$ и $\mathbf{p}|_{u=0}$ и вектором $\mathbf{s}(u)$ остается неизменным. Отметим, что последнее утверждение справедливо в случае, когда модуль упругости черенка на изгиб существенно меньше модуля упругости его на кручение.

Кроме самостоятельного поворота каждого отдельного листа под действием ветра, в нашем модельном растительном покрове может происходить также и принудительный поворот листьев, связанный с изгибом стеблей, который будем характеризовать, например, косинусом угла отгиба стебля от недеформированного состояния — t . В этом случае при решении задачи о самостоятельном повороте листьев следует считать начальными компонентами листовой нормали величины:

$$\begin{aligned} s_{0x}^* &= s_{0x} t - s_{0z} \sqrt{1 - t^2}, \\ s_{0y}^* &= s_{0y}, \\ s_{0z}^* &= s_{0x} \sqrt{1 - t^2} + s_{0z} t. \end{aligned} \quad (1)$$

По таким же формулам необходимо рассчитывать и «недеформированные» компоненты вектора черенка ρ_{0x}^* , ρ_{0y}^* , ρ_{0z}^* .

Имея в виду сделанное выше предположение о деформации листового черенка без кручения, отметим, что задачу о самостоятельном повороте листа под действием ветра удобно решать в такой системе координат, ось x которой направлена по-прежнему навстречу ветру, а ось ординат лежит в плоскости $\{\mathbf{i}, \mathbf{p}_0(\lambda)\}$, т. е. в системе, локальной для каждого листа, повернутой вокруг оси x относи-

тельно ранее введенной основной на угол $\omega = \text{arctg} \frac{\rho_{0x} \sqrt{1 - t^2} + \rho_{0z} t}{\rho_{0y}}$.

Во введенной таким образом системе координат $\eta \xi$ ξ -компонента вектора нормали к листу не изменяется при повороте, не сопровождающемся кручением черенка.

В локальной системе координат компоненты «недеформированного» вектора s равны:

$$\begin{aligned}s_x^{(0)} &= s_{0x}t - s_{0z}\sqrt{1-t^2}, \\ s_\eta^{(0)} &= s_{0y}\cos\omega + s_{0x}\sqrt{1-t^2}\sin\omega + s_{0z}, \\ s_\zeta^{(0)} &= s_{0x}\sqrt{1-t^2}\cos\omega - s_{0y}\sin\omega + s_{0z}t\cos\omega.\end{aligned}\quad (2)$$

Сила, обуславливающая самостоятельный поворот листа, обязана своим происхождением его аэродинамическому сопротивлению, возникающему при обтекании листа воздушным потоком. Эту силу, как известно [10], можно выразить через эмпирический коэффициент сопротивления c_w так:

$$- \rho_{\text{air}} c_w s u u. \quad (3)$$

Коэффициент сопротивления листа, представляющего собой плоскую пластинку, заданным образом ориентированную в воздушном потоке, согласно [19], можно описать эмпирической зависимостью вида

$$c_w = c_f + c_b = 1,4 \sqrt{\frac{v_{\text{air}}}{2r_w u}} + a \left| \frac{(su)}{su} \right|. \quad (4)$$

В этой формуле c_f и c_b — коэффициенты сопротивления трения и ориентации плоского листа.

Установившаяся ориентация листа, находящегося в воздушном потоке, определяется величинами s_x , s_η , s_ζ , которые можно найти из условия незакручивания черенка $s_\zeta = 0$ и уравнения равновесия, выражающего равенство аэродинамической силы, поворачивающей лист, и упругой силы деформации черенка листа. Имея в виду, что удельное число листьев (количество листьев в единице объема)

можно выразить как $\frac{s}{\pi_w r_w^2}$, из (3) и (4) после некоторых преобразований для уравнения равновесия получим:

$$\begin{aligned}& \frac{\rho_{\text{air}} \pi_w r_w^2}{e_w} \frac{\sqrt{(s_x^{(0)})^2 + (s_\eta^{(0)})^2}}{s^2} \left\{ 1,4 v_{\text{air}}^{1/2} u^{3/2} (2r_w)^{-1/2} \sqrt{s^2 - (s_\zeta^{(0)})^2 - s_\eta^2} + \right. \\ & \quad \left. + a u^2 \frac{s^2 - (s_\zeta^{(0)})^2 - s_\eta^2}{s} \right\} = \\ & = \arccos \frac{s_x^{(0)} \sqrt{s^2 - (s_\zeta^{(0)})^2 - s_\eta^2} + s_\eta^{(0)} s_\eta + (s_\zeta^{(0)})^2}{s^2}.\end{aligned}\quad (5)$$

Решение этого трансцендентного уравнения $s_\eta(u)$ определяет установившееся положение листа, чья ориентация при отсутствии ветра задана векторами s_0 и p_0 на таком уровне λ в растительном покрове, где скорость ветра равна u , а косинус угла отгиба стебля от недеформированного положения равен t . Отметим, что для того

чтобы получить компоненты вектора удельной листовой поверхности в основной системе x, y, z , необходимо перейти от величин $\{s_x, s_y, s_z\}$ к $\{s_x^*, s_y^*, s_z^*\}$, используя преобразование, обратное (2).

На рис. 1 представлены функции $s_x^*(u)$, $s_y^*(u)$, $s_z^*(u)$, полученные в результате решения уравнения (5) при следующем наборе фитометрических параметров растительности:

$$\begin{aligned} \pi_w &= 1, & e_w &= 0,3 \cdot 10^2 \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-2}, \\ r_w &= 6 \text{ см}, \\ s_{0x} &= 0,035 \text{ см}^{-1}, & s_{0y} &= 0,035 \text{ см}^{-1}, \\ s_{0z} &= 0,035 \text{ см}^{-1}, \\ \rho_{0x} &= 0,5, & \rho_{0y} &= 0,5, & \rho_{0z} &= -1, \\ t &= 0,5. \end{aligned}$$

Эти параметры соответствуют листу площадью 36 см^2 , черенок которого лежит в пятом октанте, т. е. составляет с вектором скорости ветра тупой угол.

Принудительный поворот листа, вызванный изгибом стебля ($t=0,5$), приводит к тому, что в своем начальном положении вектор удельной листовой поверхности находится во втором октанте, тогда как при $t=1$ лежит в первом октанте. С ростом скорости ветра до $34 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ происходит поворот листа, приводящий к увеличению по абсолютной величине x -вой компоненты вектора s . При $u=34 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ y -вая составляющая удельной листовой поверхности равна нулю, т. е. черенок листа становится перпендикулярным направлению ветра. Дальнейшее увеличение скорости ветра вызывает быстрое уменьшение x -вой координаты вектора s , которая при $u \rightarrow \infty$ естественно стремится к нулю (лист поворачивается вдоль ветра так, что его аэродинамическое сопротивление минимально и равно c_f).

Изложенная методика определения самостоятельного поворота листьев под ветром не может считаться полной до тех пор, пока не будет определена функция $t(\lambda)$, характеризующая изгиб стеблей растений или, другими словами, форма стебля, которую он приобретает, находясь в поле скорости.

Для расчета $t(\lambda)$ будем пользоваться уравнением равновесия круглого прямолинейного стержня переменного радиуса $r_s(\lambda)$ при действии на него рассредоточенной силы с заданной линейной

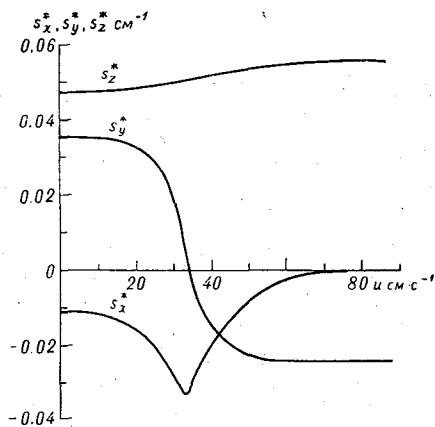


Рис. 1. Зависимость компонент вектора листовой поверхности от скорости ветра.

плотностью $dE/d\lambda$, действующей перпендикулярно линии недеформированного состояния:

$$\frac{dF}{d\lambda} = \frac{\rho_{\text{air}} c_w s u^2}{m_w}. \quad (6)$$

Далее, следуя [4], выпишем уравнение равновесия стебля в виде

$$\frac{\pi}{4} e_s \frac{d}{d\lambda} \frac{r_s^4 dt/d\lambda}{\sqrt{1-t^2}} = Ft. \quad (7)$$

Для решения уравнения (7) необходимо использовать равенства:

$$t|_{\lambda=0}=1, \quad dt/d\lambda|_{\lambda=H}=0,$$

выражающие граничные условия закрепления нижнего конца стебля в почве и свободного верхнего конца.

Выписанные соотношения могут быть использованы для нахождения формы стеблей, что вместе с (5) и связанными с ним (1) и (2) решает задачу механического равновесия модельного фитоценоза, находящегося в заданном поле скорости $u(\lambda)$.

2. Изложенная схема расчета влияния ветра на фитометрическую структуру растительного покрова требует задания распределения скорости $u(\lambda)$. Здесь мы введем необходимые для определения этой функции соотношения, исходя из известных уравнений, применяемых в теории режима турбулентности приземного слоя атмосферы. Учет условий, вызывающих специфику вихревого режима межлистного пространства, будем производить феноменологическим путем, рассматривая физические закономерности механизмов, обуславливающих эту специфику.

Существенной особенностью формирования турбулентного режима в приземном слое, содержащем растительный покров, является тот факт, что сила трения, воспринимающая импульс вихревого потока, локализована не на поверхности почвы, а распределена по высоте в растительности в соответствии с распределением скорости и деятельной поверхности растительности. Поэтому уравнение движения приземного турбулентного потока должно иметь вид [7, 8]

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{k}{t} \frac{du}{d\lambda} \right) = c_w s u^2. \quad (8)$$

В левую часть этого уравнения вошла величина t , поскольку вертикальная координата в нашем случае отсчитывается вдоль деформированных стеблей растений, т. е. $\frac{d}{dz} = \frac{1}{t} \frac{d}{d\lambda}$. Уравнение движения в форме (8) отражает факт постепенной диссипации импульса осредненного движения за счет существования распределенного «стока» импульса, причем удельная мощность этого «стока» пропорциональна силе сопротивления листьев, находящихся в единице объема.

Чтобы уравнение (8) было применимо для нахождения $u(\lambda)$ и в случае, когда растительный покров занимает только нижнюю часть приземного слоя, необходимо договориться о виде функции $t(\lambda)$ при $\lambda > h$. Наиболее естественным и удобным, с нашей точки зрения, является определение $t(\lambda)$ в виде

$$t(\lambda) = \begin{cases} t(2H - \lambda) & \text{при } H < \lambda < 2H \\ 1 & \text{при } 2H \leq \lambda. \end{cases}$$

Граничные условия, при которых следует решать уравнение (8), должны отражать факт постоянства напряжения трения выше слоя растительного покрова и обращение скорости в нуль на уровне шероховатости почвы, т. е.

$$\frac{k}{t} \frac{du}{d\lambda} \Big|_{\lambda > H} = u_*^2, \quad u \Big|_{\lambda = \lambda_0} = 0. \quad (9)$$

Уравнение (8) вместе с ранее выведенными фитомеханическими соотношениями недостаточно для нахождения функции $u(\lambda)$ и связанных с ней $s(\lambda)$, $c_w(\lambda)$, $t(\lambda)$, так как содержит коэффициент вихревой вязкости k , величина и вертикальный профиль которого, как показывают эксперименты [12, 20], не могут быть определены независимо от других характеристик метеорологического режима.

Для нахождения $k(\lambda)$ будем пользоваться уравнением переноса кинетической энергии пульсационного движения, которое успешно применялось для этих целей в теоретических исследованиях турбулентного режима пограничного слоя атмосферы (см., например, [3]).

Вид уравнения баланса энергии турбулентности в межлистном пространстве легче будет уяснить, предварительно рассмотрев турбулентный пограничный слой на отдельном плоском листе. Этот локальный пограничный слой будем рассматривать в ортогональной системе координат x_1, x_2, x_3 , ось x_3 которой направлена вертикально вверх. В наиболее общем случае в пределах этого пограничного слоя не остаются постоянными температура и влажность, что связано с естественными процессами теплообмена и транспирации растений.

Уравнение переноса вихревой энергии в пограничном слое на листе в пренебрежении членами, содержащими пульсации давления и молекулярную вязкость, в стационарных условиях имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(E_i \bar{u}_i + \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \overline{u'_j u'_j u'_i} \right) = & -\rho_{\text{air}} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \beta g \rho_{\text{air}} \overline{T' u'_3} + \\ & + 0,61 g \overline{q' u'_3} - \rho_{\text{air}} \bar{\epsilon}_i, \quad i=1, 2, 3. \end{aligned} \quad (10)$$

В этом уравнении по повторяющимся индексам предполагается суммирование. Помимо прочих, в (10) приняты следующие обозначения: E_i — удельная мощность турбулентных пульсаций; $\bar{u}_i$, u'_i — компоненты средней скорости и пульсации скорости в направлении

оси x_i ; T' , q' — пульсации температуры и влажности, $\overline{\varepsilon_t}$ — средняя удельная мощность механизма диссипации вихревой энергии в тепло. Черта сверху обозначает статистическое осреднение. Следует помнить, что обозначения величин уравнения (10), несмотря на их сходство с перечисленными в списке символов, относятся к характеристикам турбулентного пограничного слоя на единичном листе.

Проинтегрируем формально уравнение (10) по всему объему пограничного слоя на листе и, учитывая, что поток турбулентной энергии внутрь листа естественно равен нулю, напишем

$$\int_{\delta\Sigma} \Pi_n d(\delta\Sigma) \approx \delta(\text{Trans})_u + \delta(\text{Trans})_T + \frac{\delta(\text{Trans})_q}{\rho_{\text{air}}} - \delta(\text{Diss}). \quad (11)$$

В этом выражении $\int_{\delta\Sigma} \Pi_n d(\delta\Sigma)$ — количество вихревой энергии, «вытекающей» в единицу времени из локального пограничного слоя на листе, $\delta\Sigma$ — полуплощадь поверхности, ограничивающей этот пограничный слой от межлиственного пространства. Величины в правой части (11) обозначают проинтегрированные по объему $\delta\Sigma$ локального пограничного слоя слагаемые правой части уравнения (10).

Если теперь интересоваться турбулизацией вихревого потока, вызванной присутствием в нем листьев как препятствий, то величина

$$\frac{2 \int_{\delta\Sigma} \Pi_n d(\delta\Sigma)}{\delta V} \quad (12)$$

будет характеризовать удельную мощность источника этого дополнительного завихрения.

Используя известные полуэмпирические соотношения [10] и учитывая (12), приведем уравнение (10) в нашем случае горизонтально однородного межлиственного пространства к виду, принятому в теории пограничного слоя атмосферы, а именно:

$$\begin{aligned} & \frac{k}{t} \left(\frac{du}{d\lambda} \right)^2 - g\beta\alpha_T k \frac{dT}{d\lambda} - \frac{0,61g}{\rho_{\text{air}}} \alpha_q k \frac{dq}{d\lambda} + \\ & + \frac{2 \int_{\delta\Sigma} \Pi_n d(\delta\Sigma)}{\delta V} = \frac{b^{3/2} t}{cl} - \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_b k}{t} \frac{db}{d\lambda} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Это и есть искомое уравнение баланса вихревой энергии в межлиственном пространстве растительного покрова. Заметим, что в случае отсутствия препятствий ($\delta\Sigma=0$) оно естественно переходит в уравнение, применявшееся ранее в задачах динамики турбулентности в приземном слое.

Оставим до поры выяснение влияния отдельных характеристик метеорологического режима на дополнительное слагаемое в уравнении (13), хотя факт такого влияния очевиден.

В уравнение баланса турбулентной энергии, помимо уже определенных величин, вошли масштаб l и интенсивность b турбулентности, что требует введения в рассмотрение еще двух соотношений, связывающих их с уже описанными.

Как и в большинстве современных исследований по турбулентности, будем предполагать, что структура вихревого поля в межлистном пространстве такова, что удовлетворяет гипотезе автономности, иначе говоря, описывается двумя характеристиками, имеющими смысл масштабов длины и скорости [11]. Если это так, то и в нашем случае справедливо соотношение

$$k = l \sqrt{b}. \quad (14)$$

Справедливости ради следует отметить далеко не полную очевидность того, что режим турбулентности в межлистном пространстве будет таковым. Так, результатом дополнительной турбулизации вихревого течения на фитозлементах может быть, например, появление добавочных экстремумов на энергетическом спектре турбулентности в межлистном пространстве [5]. Последнее может привести к нарушению обычного строения турбулентности; в таком случае описание структуры подобного турбулентного поля, строго говоря, невозможно провести с использованием только двух масштабов.

Пока что мы не будем останавливаться на этом специальном вопросе, который требует детального исследования, и здесь постулируем справедливость гипотезы, выражаемой (14), в случае турбулентности в межлистном пространстве.

Для замыкания системы уравнений турбулентного режима необходимо иметь соотношение, связывающее масштаб турбулентности l с другими ранее определенными характеристиками течения. Возможность использования какого-либо выражения для масштаба турбулентности в нашем случае следует оценивать по тому, насколько успешно оно может быть применено как в случае турбулентности в межлистном пространстве, так и при отсутствии растительности. Это связано с тем, что расчет характеристик вихревого режима естественно проводить для приземного слоя, содержащего в нижней своей части растительный покров любой фитометрической структуры. Кстати, требуемому условию удовлетворяют уравнения движения (8) и баланса энергии турбулентности (13). В нашем случае для описания формирования масштаба турбулентности в приземном слое можно воспользоваться выражением

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{tx} \left(\frac{s}{d} - \frac{1}{\psi} \frac{d\psi}{d\lambda} \right), \quad (15)$$

где $\psi = \frac{k^2 t}{c l^k}$.

Равенство (15) получается путем включения дополнительного слагаемого $\frac{s}{txd}$ в известную формулу для l , предложенную в [3].

Это вызвано естественным соображением, заключающимся в том, что турбулентность в достаточно густом растительном покрове должна характеризоваться масштабом, зависящим от размера ячейки межлистного пространства, который тем меньше, чем больше густота растительности — его удельная листовая поверхность s . Также ясно, что при уменьшении величины s все большее влияние на l должна оказывать почва как подстилающая поверхность при «пристеночной» турбулентности.

Приведенные ниже результаты расчета характеристик вихревого режима в растительном покрове, построенные на использовании феноменологического соотношения (15), отражающего описанную закономерность формирования масштаба турбулентности, показали достаточно хорошее качественное соответствие рассчитанных профилей l полученным экспериментально [16].

Следует отметить, что и более точные, с теоретической точки зрения, построения дают модель для l , качественно близкую к (15). Здесь, однако, мы не будем излагать этих построений, так как они, пожалуй, не имеют прикладной агрометеорологической направленности; заметим лишь, что такое рассмотрение отчасти дает возможность проследить зависимость параметра дисперсности d от характерного размера фитоэлементов: уменьшение этого размера при постоянном s приводит к уменьшению величины d .

И в заключение выпишем условие на поверхности почвы для уравнения (15) (см., например, [3]):

$$l|_{\lambda=\lambda_0} = \kappa c^{-1/3} \lambda_0.$$

3. Любая модель режима метеорологических элементов в фитоценозе не может считаться агрометеорологически ценной, если в ней не рассмотрен жизненно важный для растений процесс теплового и водного обмена с окружающей их средой. Известно, что воздействие погодных и климатических условий на продуктивность в большой степени связано с влиянием на растительность температурных и водных перегрузок. Вместе с этим такое рассмотрение необходимо предпринять также и с точки зрения теоретической корректности излагаемой здесь математической модели: выписанные ранее уравнения все еще не составляют замкнутой системы, так как в уравнение (13) входит еще не определенный член (12), явно зависящий от условий теплового и водного обмена фитоэлементов с воздухом межлистного пространства.

В естественных условиях листья и другие фитоэлементы растительного покрова, расположенные на некотором заданном уровне, вообще говоря, по-разному освещены солнечной радиацией: некоторые листья затенены расположенными выше, другие находятся в светлых пятнах, в которых основная доля приходящего излучения падает на прямую солнечную радиацию. Это приводит к тому, что температура фитоэлементов распределяется по их поверхности сложно. Поэтому температурное поле поверхности, например листьев, следует характеризовать более чем одной величиной.

Пусть нам известна доля $p(\lambda)$ поверхности листьев, находящихся на некотором уровне λ в растительном покрове и попадающих в солнечные пятна. Тогда, введя величины $T^{\uparrow\text{sun}}, T^{\downarrow\text{sun}}, T^{\uparrow\text{shad}}, T^{\downarrow\text{shad}}$, для интенсивности теплообмена участка поверхности листа $\delta\Sigma$ с воздухом межлистного пространства можно написать

$$+ \rho_{\text{air}} c_p p \delta\Sigma \{D_T^{\uparrow\text{sun}} (T^{\uparrow\text{sun}} - T) + D_T^{\downarrow\text{sun}} (T^{\downarrow\text{sun}} - T)\} + \\ + \rho_{\text{air}} c_p (1-p) \delta\Sigma \{D_T^{\uparrow\text{shad}} (T^{\uparrow\text{shad}} - T) + D_T^{\downarrow\text{shad}} (T^{\downarrow\text{shad}} - T)\}. \quad (16)$$

Интегральные коэффициенты теплообмена $D_T^{\uparrow\text{sun}}, D_T^{\downarrow\text{sun}}, D_T^{\uparrow\text{shad}}, D_T^{\downarrow\text{shad}}$, строго говоря, различны и зависят сложным образом от условий обтекания листьев турбулентным потоком воздуха, фитометрии покрова и перепада температур воздух—поверхность листа. Можно с полной уверенностью утверждать, что теоретический расчет их многофакторной зависимости от влияющих параметров в настоящее время невозможен, поэтому для оценки величины коэффициентов теплообмена следует пользоваться эмпирическими данными.

Сейчас усилиями многих исследователей значительно продвинута полуэмпирическая теория теплопередачи, ориентированная на потребности расчетов инженерных теплообменных конструкций, тогда как экспериментальных данных, касающихся закономерностей теплообмена реальных листьев, все еще недостаточно.

Естественно, что теплообмену фитоэлементов с воздухом межлистного пространства присущи определенные особенности, однако можно думать, что общие закономерности теплообмена как физического процесса во многом схожи даже для теплоотдающих поверхностей различных конфигураций. Здесь для расчета интегральных коэффициентов, введенных в (16), мы предлагаем использовать эмпирические зависимости, полученные при изучении теплообмена пучков труб при омывании их турбулентным потоком газа [9].

Если считать, что теплообмен поверхности листа с воздухом межлистного пространства осуществляется посредством вынужденной и свободной конвекции и эти два механизма работают параллельно, то в этом случае для числа Nu , характеризующего интегральные коэффициенты теплообмена, можно написать

$$Nu = Nu_{\text{force}} + Nu_{\text{free}} \quad (17)$$

и далее, исходя из данных, приведенных в [9],

$$Nu_{\text{force}} = a_1 Re^{n_1}, \quad Nu_{\text{free}} = a_2 (GrPr)^{n_2}. \quad (18)$$

Эмпирические параметры a_1, a_2, n_1, n_2 сильно зависят от условий теплоотдачи; их значения приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

$u \cdot 2r_w \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	a_1	n_1
0,75—45	0,81	0,40
> 45	0,33	0,60

Таблица 2

$(2r_w)^3 \Delta T \text{ см}^3 \cdot \text{град.}$	a_2	n_2
10—6—10 ⁻⁵	0,50	0
10 ⁻⁵ —5	1,18	1/8
5—2 · 10 ⁵	0,54	1/4
2 · 10 ⁵ —10 ¹¹	0,135	1/3

Подстановка (18) в формулы, определяющие интегральные коэффициенты теплоотдачи, дает

$$\begin{aligned}
 D_T^{\uparrow \text{sun}} &= \frac{\lambda_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}} c_p} \left\{ \frac{a_1 \text{Re}^{n_1}}{2r_w} + \frac{a_2 \text{Pr}^{n_2} \beta g (2r_w)^2}{\nu_{\text{air}}^2} |T^{\uparrow \text{sun}} - T|^{n_2} \right\}, \\
 D_T^{\downarrow \text{sun}} &= \frac{\lambda_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}} c_p} \left\{ \frac{a_1 \text{Re}^{n_1}}{2r_w} + \frac{a_2 \text{Pr}^{n_2} \beta g (2r_w)^2}{\nu_{\text{air}}^2} |T^{\downarrow \text{sun}} - T|^{n_2} \right\}, \\
 D_T^{\uparrow \text{shad}} &= \frac{\lambda_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}} c_p} \left\{ \frac{a_1 \text{Re}^{n_1}}{2r_w} + \frac{a_2 \text{Pr}^{n_2} \beta g (2r_w)^2}{\nu_{\text{air}}^2} |T^{\uparrow \text{shad}} - T|^{n_2} \right\}, \\
 D_T^{\downarrow \text{shad}} &= \frac{\lambda_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}} c_p} \left\{ \frac{a_1 \text{Re}^{n_1}}{2r_w} + \frac{a_2 \text{Pr}^{n_2} \beta g (2r_w)^2}{\nu_{\text{air}}^2} |T^{\downarrow \text{shad}} - T|^{n_2} \right\}. \quad (19)
 \end{aligned}$$

Применимость формул (19) для описания закономерностей теплообмена листьев показана сравнением характерных значений D_T , рассчитанных по (19) и с использованием частной зависимости, предложенной в [17]. Хорошее согласование величин интегральных коэффициентов теплообмена, полученных этими двумя способами, при тех условиях обтекания, когда допустимо использование обеих формул, послужило определенным подтверждением возможности описания $D_T^{\uparrow \text{sun}}$, $D_T^{\downarrow \text{sun}}$, $D_T^{\uparrow \text{shad}}$, $D_T^{\downarrow \text{shad}}$ равенствами (19). Тем не менее аппроксимация коэффициентов теплообмена воздух—лист при помощи простейших формул (19), конечно, не является универсальной и может вызвать определенные возражения. В частности, эти формулы не отражают случай резонанса энергосодержащих пульсаций внешнего турбулентного потока с вихрями, срывающимися с препятствий—фитозлементов—в межлистное пространство. По оценкам, приведенным в [15], это явление может заметно

повлиять на коэффициент теплоотдачи. Формулы (19) не полностью учитывают также и влияние ориентации листьев на теплообмен.

Для детализации подобных зависимостей необходима постановка тщательных натурных экспериментов, которые до настоящего времени или совсем не проводились, или же проводились в очень малом количестве и к тому же имели далеко не агрометеорологическую направленность.

Имея в виду, что теплообмен фитоэлементов с воздухом межлиственного пространства должен в нашем случае приводить к изменению лишь вертикального потока тепла в растительном покрове, выпишем уравнение турбулентного теплопереноса в виде

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_r^k}{t} \frac{dT}{d\lambda} \right) = -sp \{ D_T^{\uparrow \text{sun}} (T^{\uparrow \text{sun}} - T) + D_T^{\downarrow \text{sun}} (T^{\downarrow \text{sun}} - T) \} - \\ - s(1-p) \{ D_T^{\uparrow \text{shad}} (T^{\uparrow \text{shad}} - T) + D_T^{\downarrow \text{shad}} (T^{\downarrow \text{shad}} - T) \}. \quad (20)$$

Закономерности процессов теплообмена и парообмена в растительном покрове во многом схожи. Так, уравнение влагопроводности в нашем случае стационарного одномерного процесса, по естественной аналогии с (20), имеет вид

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_q^k}{t} \frac{dq}{d\lambda} \right) = -sp \{ D_q^{\uparrow \text{sun}} (q^{\uparrow \text{sun}} - q) + D_q^{\downarrow \text{sun}} (q^{\downarrow \text{sun}} - q) \} - \\ - s(1-p) \{ D_q^{\uparrow \text{shad}} (q^{\uparrow \text{shad}} - q) + D_q^{\downarrow \text{shad}} (q^{\downarrow \text{shad}} - q) \}. \quad (21)$$

Если установление вида уравнения турбулентной влагопроводности межлиственного пространства не представляет особого труда, то выявление зависимости коэффициентов парообмена воздух—лист от агрометеорологических и физиологических факторов представляет собой сложную исследовательскую задачу. Это становится понятным из рассмотрения механизма испарения влаги транспирационно активными фитоэлементами.

Как известно, путь воды на конечной стадии транспирации таков: внутриклеточный объем, насыщенный жидкой фазой, — межклеточное воздушное пространство — устьичный просвет — прилистный пограничный слой — воздух межлиственного пространства. При нашем интегральном рассмотрении конечной стадии транспирации этот путь удобно характеризовать некоторым суммарным коэффициентом проводимости, что и сделано в (21). Здесь необходимо за-

метить, что, несмотря на формальную аналогию величин q и q^{sun} , $q^{\downarrow \text{sun}}$, $q^{\uparrow \text{shad}}$, $q^{\downarrow \text{shad}}$, они имеют разный физический смысл. Если q определенно следует понимать как влажность воздуха ($\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$), то $q^{\uparrow \text{sun}}$, $q^{\downarrow \text{sun}}$, $q^{\uparrow \text{shad}}$, $q^{\downarrow \text{shad}}$ представляют собой некую эквивалентную концентрацию водяного пара, соответствующую величине парциальной свободной энергии жидкой фазы воды в протоплазме

паренхимных клеток. Только при такой аналогии $D_q^{\uparrow \text{sun}}, D_q^{\downarrow \text{sun}}, D_q^{\uparrow \text{shad}}, D_q^{\downarrow \text{shad}}$ имеют смысл обычных интегральных коэффициентов диффузии ($\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$).

Представление функции мощности источника пара в межлистном пространстве в виде четырех слагаемых, как это сделано в (21), связано с тем, что разные условия освещенности участков листа могут явиться причиной различия величин $q^{\uparrow \text{sun}}, q^{\downarrow \text{sun}}, q^{\uparrow \text{shad}}, q^{\downarrow \text{shad}}$ и $D_q^{\uparrow \text{sun}}, D_q^{\downarrow \text{sun}}, D_q^{\uparrow \text{shad}}, D_q^{\downarrow \text{shad}}$, соответствующих им. В этом главную роль играют физиологические регуляционные механизмы растения.

Можно думать, что при не слишком экстремальных условиях: близости температур $T^{\uparrow \text{sun}}, T^{\downarrow \text{sun}}, T^{\uparrow \text{shad}}, T^{\downarrow \text{shad}}$ и при достаточно медленном изменении внешних параметров величины $q^{\uparrow \text{sun}}, q^{\downarrow \text{sun}}, q^{\uparrow \text{shad}}, q^{\downarrow \text{shad}}$ и $D_q^{\uparrow \text{sun}}, D_q^{\downarrow \text{sun}}, D_q^{\uparrow \text{shad}}, D_q^{\downarrow \text{shad}}$ не будут сильно отличаться друг от друга. В таком случае уравнение (21) упрощается до

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_q k}{t} \frac{dq}{d\lambda} \right) = -2sD_q(q_w - q). \quad (22)$$

Если в этом уравнении q_w понимать как влажность в воздушных межклеточниках листа, то D_q будет иметь смысл коэффициента проводимости устьиц и пограничного слоя на листе.

При такой интерпретации величин q_w и D_q для D_q по аналогии с D_T можно воспользоваться эмпирическими зависимостями [9], например:

$$D_q = \frac{\frac{\chi_q a_1 \text{Re}^{n_1} \text{Sc}_q^{0,3}}{2r_w} D}{\frac{\chi_q a_1 \text{Re}^{n_1} \text{Sc}_q^{0,3}}{2r_w} + D}. \quad (23)$$

Эта формула отражает обычный факт последовательного сложения сопротивлений, встречающихся на пути водяного пара, диффундирующего из межклеточников через устьичные отверстия ($1/D$), через пограничный слой на листе $\left(\frac{2r_w}{\chi_q a_1 \text{Re}^{n_1} \text{Sc}_q^{0,3}} \right)$ в воздух межлистного пространства.

Теперь, когда закономерности теплового и парового обмена листьев в общих чертах рассмотрены, мы можем с большей определенностью говорить о виде слагаемого (12) в уравнении (13), описывающего дополнительную турбулизацию приземного потока на фитоэлементах покрова. Из сравнения (11) и (13) можно заклю-

чить, что формально

$$\begin{aligned}
 \delta(\text{Trans})_T &= \int_{\delta V} \beta g \rho_{\text{air}} \overline{T' u_3} d(\delta v) \sim \delta \Sigma \Delta_T \beta \rho_{\text{air}} \left(\overline{T' u_3} \right)_{\text{mid}}, \\
 \delta(\text{Trans})_q &= \int_{\delta V} 0,61 g \overline{q' u_3} d(\delta v) \sim \delta \Sigma \Delta_q 0,61 g \left(\overline{q' u_3} \right)_{\text{mid}}, \\
 \delta(\text{Trans})_u &= - \int_{\delta V} \rho_{\text{air}} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} d(\delta v) \sim - \rho_{\text{air}} \delta \Sigma \Delta_u \left(\overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)_{\text{mid}}, \\
 \delta(\text{Diss}) &= \int_{\delta V} \rho_{\text{air}} \bar{\varepsilon}_t d(\delta v) \sim \rho_{\text{air}} \delta \Sigma \Delta_d (\bar{\varepsilon}_t)_{\text{mid}}. \quad (24)
 \end{aligned}$$

Величины Δ_T , Δ_q , Δ_u , Δ_d — параметры размерности длины, отчасти аналогичные толщине температурного пограничного слоя на препятствии [10], толщине потери энергии и толщине диссипации [15]. Далее, заметим, что выражения $\rho_{\text{air}} c_p \frac{\delta \Sigma}{\delta V} (\overline{T' u'})_{\text{mid}}$ и $\frac{\delta \Sigma}{\delta V} (\overline{q' u'})_{\text{mid}}$ представляют собой теплоотдачу и парообмен поверхности площадью $\delta \Sigma$ для фитоэлементов, заключенных в объеме δV растительного покрова. Эти элементарные притоки сложно распределены между различным образом освещенными и ориентированными участками фитоэлементов в δV . Интересуясь их совокупным действием и имея в виду равенства (20) и (21), в конечном итоге напомним

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta \Sigma}{\delta V} (\overline{T' u_3})_{\text{mid}} &\sim \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_T k}{t} \frac{dT}{d\lambda} \right), \\
 \frac{\delta \Sigma}{\delta V} (\overline{q' u_3})_{\text{mid}} &\sim \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_q k}{t} \frac{dq}{d\lambda} \right). \quad (25)
 \end{aligned}$$

Для $\delta(\text{Trans})_u$, используя (24) вместе с некоторыми полуэмпирическими соотношениями, можно получить выражение, аналогичное (25), однако здесь, руководствуясь очевидными физическими соображениями [15], напомним для мощности источника дополнительной диссипации энергии осредненного движения в вихревую [7]

$$\delta(\text{Trans})_u = \rho_{\text{air}} c_w u^3 \delta \Sigma. \quad (26)$$

С учетом сделанных преобразований уравнение баланса энергии турбулентности переписывается в виде

$$\begin{aligned}
 \frac{k}{t} \left(\frac{du}{d\lambda} \right)^2 - \beta g \alpha_T k \frac{dT}{d\lambda} - \frac{0,61g}{\rho_{\text{air}}} \alpha_q k \frac{dq}{d\lambda} + s [c_w u^3 - \Delta_d (\bar{\varepsilon}_t)_{\text{mid}}] + \\
 + \beta \Delta_T g \left| \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_T k}{t} \frac{dT}{d\lambda} \right) \right| + \frac{0,61g}{\rho_{\text{air}}} \Delta_q \left| \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_q k}{t} \frac{dq}{d\lambda} \right) \right| = \\
 = \frac{b^{3/2} t}{cl} - \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_b k}{t} \frac{db}{d\lambda} \right). \quad (27)
 \end{aligned}$$

Приведенный вывод уравнения (27), конечно, не претендует на полную строгость, однако абсолютно строгое определение механизмов, описывающих динамическую и термическую генерацию пульсационной энергии в растительном покрове, затруднено вследствие неуниверсальности строения локальных турбулентных пограничных слоев на естественных фитоэлементах.

В заключение этого параграфа выпишем граничные условия для уравнений турбулентного тепло- и влагопереноса (20), (21), а также для уравнения баланса вихревой энергии (27). Будем считать, что на достаточно удаленном от верхней границы растительного покрова уровне температура и влажность воздуха формируются внешними метеорологическими факторами и являются заданными величинами, т. е.

$$\begin{aligned} T|_{\lambda=3H} &= T_{\text{up}}, \\ q|_{\lambda=3H} &= q_{\text{up}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Для уравнения (27) в условиях вынужденной конвекции, когда режим турбулентности в приземном слое обусловлен только сдвигом ветра, на верхней границе следует соблюсти условие

$$\frac{\alpha_b k}{t} \frac{db}{d\lambda} \Big|_{\lambda=3H} = 0. \quad (29)$$

Такое же равенство, выражающее естественное отсутствие потока вихревой энергии в почву, должно всегда выполняться при $\lambda = \lambda_0$.

В граничных условиях при $\lambda = \lambda_0$ для уравнений (20) и (21) следует задавать турбулентные потоки тепла и водяного пара, которые естественно должны подчиняться соотношению энергетического баланса поверхности почвы. Прежде чем выписывать эти условия, необходимо остановиться на закономерностях энергетического баланса в растительности, тем более, что для окончательного замыкания системы уравнений метеорологического режима растительного покрова необходимо иметь соотношения, определяющие величины $T^{\uparrow \text{sun}}$, $T^{\downarrow \text{sun}}$, $T^{\uparrow \text{shad}}$, $T^{\downarrow \text{shad}}$, которые непосредственно зависят от закономерностей теплового баланса.

4. В предыдущих параграфах уже были рассмотрены потоки явного и скрытого тепла в межлистном пространстве. Помимо знания этих потоков в нашем случае горизонтально однородного растительного покрова, для составления уравнений энергетического баланса необходимы сведения о потоках лучистой энергии: тепловой и коротковолновой солнечной радиации.

В настоящее время модель радиационного режима растительного покрова можно считать разработанной; здесь имеются в виду в основном исследования [13, 14], которые являются наиболее тщательными и учитывающими в естественной взаимосвязи комплекс

факторов, влияющих на распределение коротковолновой радиации в фитоценозах. Мы не будем излагать подробно деталей этой модели, отметим лишь, что она является достаточной и удобной для расчета необходимых в наших построениях вертикальных потоков

нисходящей $R^\downarrow(\lambda)$, восходящей $R^\uparrow(\lambda)$ рассеянной коротковолновой радиации и ранее введенной функции $\rho(\lambda)$. Более того, разработанную в отмеченных исследованиях методику, до настоящего времени применявшуюся лишь для расчетов коротковолновых потоков, при незначительной модификации можно с успехом употребить и при расчетах длинноволнового излучения в растительном покрове. При этом необходимо только произвести некоторые естественные упрощения уравнений переноса радиации и включить в них в качестве источника члены, описывающие тепловое излучение фитоэлементов при температурах $T^\uparrow_{\text{sun}}$, $T^\downarrow_{\text{sun}}$, $T^\uparrow_{\text{shad}}$, $T^\downarrow_{\text{shad}}$. Составленные таким образом уравнения позволят рассчитать в рамках общей системы уравнений метеорологического режима потоки и восходящей $I^\uparrow(\lambda)$ и нисходящей $I^\downarrow(\lambda)$ длинноволновой радиации, которые являются существенными компонентами теплового баланса фитоценозов.

Уже отмеченное мозаичное строение температурного поля и поля освещенности коротковолновой и длинноволновой радиацией поверхности фитоэлементов практически исключает абсолютно строгое рассмотрение всех без исключения механизмов, формирующих температуру поверхности фитоэлементов. Здесь, по соображениям количественной значимости и с тем, чтобы не загромождать выводимых формул, мы опишем такую модель теплового баланса, в которой учтены:

а) теплообмен и парообмен фитоэлементов с воздухом меж-
листного пространства;

б) поглощение коротковолновой прямой и рассеянной солнечной радиации;

в) поглощение и излучение тепловой радиации;

г) кондуктивный теплообмен между участками поверхности листа с температурами $T^\uparrow_{\text{sun}}$, $T^\downarrow_{\text{sun}}$ и $T^\uparrow_{\text{shad}}$, $T^\downarrow_{\text{shad}}$.

Тепловые потоки в плоскости листьев здесь не будут рассматриваться, хотя включение их в общую схему не представляет принципиальной трудности.

С учетом отмеченного выпишем соотношение энергетического баланса для поверхности фитоэлементов, расположенных на уровне λ в покрове и попадающих в солнечное пятно [8]:

$$\begin{aligned} \gamma_w^{\text{short}} |S_\odot s| - \frac{dR_\downarrow}{d\lambda} - \frac{dI_\downarrow}{d\lambda} = \rho_{\text{air}} c_p s D^\uparrow_{\text{sun}} (T^\uparrow_{\text{sun}} - T) + \\ + L s D^\uparrow_q (q^\uparrow_{\text{sun}} - q) - \frac{\lambda_w s}{h} (T^\uparrow_{\text{sun}} - T^\downarrow_{\text{sun}}). \end{aligned} \quad (30)$$

Аналогичное уравнение для нижней поверхности части листа, расположенной в солнечном пятне, должно иметь вид

$$-\frac{dR_{\uparrow}}{d\lambda} + \frac{dI_{\uparrow}}{d\lambda} = \rho_{\text{air}} c_p s D_{\uparrow}^{\downarrow \text{sun}} (T^{\downarrow \text{sun}} - T) + L s D_q^{\downarrow \text{sun}} (q^{\downarrow \text{sun}} - q) - \frac{\lambda_w s}{h} (T^{\downarrow \text{sun}} - T^{\uparrow \text{sun}}). \quad (31)$$

Соотношения теплового баланса для участков поверхности листа, имеющих температуры $T^{\uparrow \text{shad}}$, $T^{\downarrow \text{shad}}$, соответственно таковы:

$$-\frac{dR_{\downarrow}}{d\lambda} - \frac{dI_{\downarrow}}{d\lambda} = \rho_{\text{air}} c_p s D_{\uparrow}^{\uparrow \text{shad}} (T^{\uparrow \text{shad}} - T) + L s D_q^{\uparrow \text{shad}} (q^{\uparrow \text{shad}} - q) - \frac{\lambda_w s}{h} (T^{\uparrow \text{shad}} - T^{\downarrow \text{shad}}), \quad (32)$$

$$\frac{dR_{\uparrow}}{d\lambda} + \frac{dI_{\uparrow}}{d\lambda} = \rho_{\text{air}} c_p s D_{\uparrow}^{\downarrow \text{shad}} (T^{\downarrow \text{shad}} - T) + L s D_q^{\downarrow \text{shad}} (q^{\downarrow \text{shad}} - q) - \frac{\lambda_w s}{h} (T^{\downarrow \text{shad}} - T^{\uparrow \text{shad}}). \quad (33)$$

Уравнения (30) — (33) взаимозависимы, так как потоки $I^{\uparrow}$ и $I^{\downarrow}$ формируются процессами излучения и поглощения всех участков листа и определяются всеми температурами $T^{\uparrow \text{sun}}$, $T^{\downarrow \text{sun}}$, $T^{\uparrow \text{shad}}$, $T^{\downarrow \text{shad}}$.

Наконец, выпишем граничные условия для уравнений (20) и (21) при $\lambda = \lambda_0$. В общем случае соотношение теплового баланса поверхности почвы должно иметь вид

$$\begin{aligned} \gamma_s^{\text{short}} \{ p(\lambda_0) | (\mathbf{S}_0 \mathbf{k}) | + R_{\downarrow}(\lambda_0) \} + \gamma_s^{\text{long}} I_{\downarrow}(\lambda_0) = B + \delta_s \sigma \{ p(\lambda_0) (T_s^{\text{sun}})^4 + \\ + [1 - p(\lambda_0)] (T_s^{\text{shad}})^4 \} + \rho_{\text{air}} c_p \{ p(\lambda_0) D_{\uparrow}^{s, \text{sun}} [T_s^{\text{sun}} - T(\lambda_0)] + \\ + [1 - p(\lambda_0)] D_{\uparrow}^{s, \text{shad}} [T_s^{\text{shad}} - T(\lambda_0)] \} + L \{ p(\lambda_0) \Gamma_q^{\text{sun}}(\lambda_0) + \\ + [1 - p(\lambda_0)] \Gamma_q^{\text{shad}}(\lambda_0) \}. \end{aligned} \quad (34)$$

Испарение из солнечного $\Gamma_q^{\text{sun}}(\lambda_0)$ и теневого $\Gamma_q^{\text{shad}}(\lambda_0)$ пятен на поверхности почвы можно описать равенствами

$$\begin{aligned} \Gamma_q^{\text{sun}}(\lambda_0) &= D_q^{s, \text{sun}} (q_s^{\text{sun}} - q), \\ \Gamma_q^{\text{shad}}(\lambda_0) &= D_q^{s, \text{shad}} (q_s^{\text{shad}} - q), \end{aligned} \quad (35)$$

в которых q_s^{sun} , q_s^{shad} — некоторые эквивалентные концентрации водяного пара, соответствующие заданной величине парциальной свободной энергии воды как компонента верхнего слоя почвы, а $D_q^{s, \text{sun}}$ и $D_q^{s, \text{shad}}$ — интегральные коэффициенты проводимости

почва—воздух. Теперь если считать известными T_s^{sun} , T_s^{shad} и, конечно, B , то соотношение (34) можно использовать в качестве нижнего граничного условия для уравнения (20). В таком случае равенства (35) вместе с (21) определяют значение влажности воздуха при $\lambda = \lambda_0$.

5. Ниже приведены результаты расчетов характеристик метеорологического режима растительного покрова по построенной модели. Эти результаты получены при применении уравнений более частного вида по сравнению с некоторыми из ранее приведенных.

а. В уравнении переноса вихревой энергии (27) опущены два последних члена левой части, описывающие дополнительную термическую турбулизацию фитоэлементами потока воздуха в межлистном пространстве. Можно утверждать, что подобное упрощение постановки задачи не повлияет значительно на характеристики метеорологического режима, особенно в случае режима вынужденной конвекции.

б. Уравнение турбулентной теплопроводности в межлистном пространстве (20) путем введения средней температуры поверхности фитоэлементов

$$T_w = \frac{p(T^{\uparrow \text{sun}} - T^{\downarrow \text{sun}}) + (1-p)(T^{\uparrow \text{shad}} + T^{\downarrow \text{shad}})}{2}$$

преобразовано к виду

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\alpha_T k}{t} \frac{dT}{d\lambda} \right) = -2sD_T(T_w - T).$$

в. В соответствии с таким упрощением уравнение влагопереноса использовано в виде (22). Влажность в воздушных межклеточниках листьев q_w считалась насыщающей и связанной с температурой T_w по формуле Магнуса

$$q_w = q_0 \exp \left\{ \frac{17,1 (T_w - 273)}{\theta + (T_w - 273)} \right\},$$

где $q_0 = 4,88 \cdot 10^{-6} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $\theta = 235^\circ \text{С}$.

г. Зависимость интегрального коэффициента теплообмена D_T от параметров, характеризующих условия обтекания, аппроксимирована формулой более частного вида (по сравнению с (18), (19)):

$$D_T = \frac{\chi}{2r_w} \{0,28 \text{Re}^{0,6} + 0,54 (\text{Gr Pr})^{0,25}\}. \quad (19')$$

д. Коротковолновая радиация не разделялась на рассеянную и прямую, а рассматривался лишь коротковолновый радиационный баланс $R(\lambda)$ в растительном покрове, профиль которого описывался зависимостью

$$dR = \gamma_w^{\text{short}} R_s d\lambda,$$

при заданной величине R над растительностью, равной $R_{\text{ур}}$.

Для восходящего и нисходящего потоков тепловой радиации использованы выражения:

$$dI_{\downarrow} = s d\lambda (\gamma_w^{\text{long}} I_{\downarrow} - \delta \sigma T_w^4),$$

$$dI_{\uparrow} = -s d\lambda (\gamma_w^{\text{long}} I_{\uparrow} + \delta \sigma T_w^4).$$

Величина восходящего потока длинноволновой радиации при $\lambda = \lambda_0$ связывалась со средней температурой поверхности почвы, а для противоизлучения атмосферы $I_{\downarrow \text{up}}$ использовалась формула Онгстрема [6]:

$$I_{\downarrow \text{up}} = \sigma T_{\text{up}}^4 (0,82 - 0,25 \cdot 10^{-0,12 \cdot 10^6 q_{\text{up}}}).$$

е. Соотношения теплового баланса (30) — (33) при описанных преобразованиях и детализации уравнений сводились к равенству

$$\frac{dR}{d\lambda} - \frac{dI_{\uparrow}}{d\lambda} - \frac{dI_{\downarrow}}{d\lambda} = 2s \{ \rho_{\text{air}} c_p D_T (T_w - T) + L D_q (q_w - q) \}, \quad (30')$$

которое использовано для вычисления осредненной температуры листьев.

Исходным параметрам, входящим в уравнения и граничные условия построенной модели, при расчетах придавались следующие значения:

$$\begin{aligned} a &= 0,42, \quad B = 0 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad d = 0,2, \\ D &= 0,1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}, \quad H = 100 \text{ см}, \quad T_{\text{up}} = 20^\circ \text{C}, \\ q_{\text{up}} &= 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}, \quad \pi_w = 1, \quad r_w = 6 \text{ см}, \\ s &= \text{const} = 0,05 \text{ см}^{-1}, \quad u_* = 30 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}, \quad \lambda_0 = 5 \text{ см}, \\ \gamma_w^{\text{short}} &= 0,5, \quad \gamma_w^{\text{long}} = 1, \quad \delta_w = \delta_s = 0,95. \end{aligned}$$

Угол между векторами $\mathbf{s}$ и $\mathbf{u}$, определяющий коэффициент аэродинамического сопротивления листа, при всех λ выбирался постоянным и равным 45° .

На рис. 2—8 представлены вертикальные профили характеристик, составляющих метеорологический режим растительного покрова, рассчитанные при различных значениях баланса коротковолновой суммарной радиации над покровом.

Естественно, что приходящая солнечная радиация оказывает наибольшее влияние на температуру и влажность воздуха межлистного пространства и на температуру поверхности листьев (рис. 2 и 3). Так, характерной особенностью вертикального профиля $T(\lambda)$ при R_{up} , равном 0,24 и 0,48 $\text{кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$ (рис. 2), является то, что на всех уровнях в покрове температура воздуха ниже, чем T_{up} , и заметно уменьшается по мере углубления в растительность. Рост R_{up} приводит к тому, что температура воздуха межлистного пространства становится выше таковой над растительностью и на зависимости $T(\lambda)$ появляется пологий максимум. Отметим, что температура воздуха для $\lambda < H$ при больших R_{up} довольно быстро меняется и остается меньшей, чем T в межлистном пространстве.

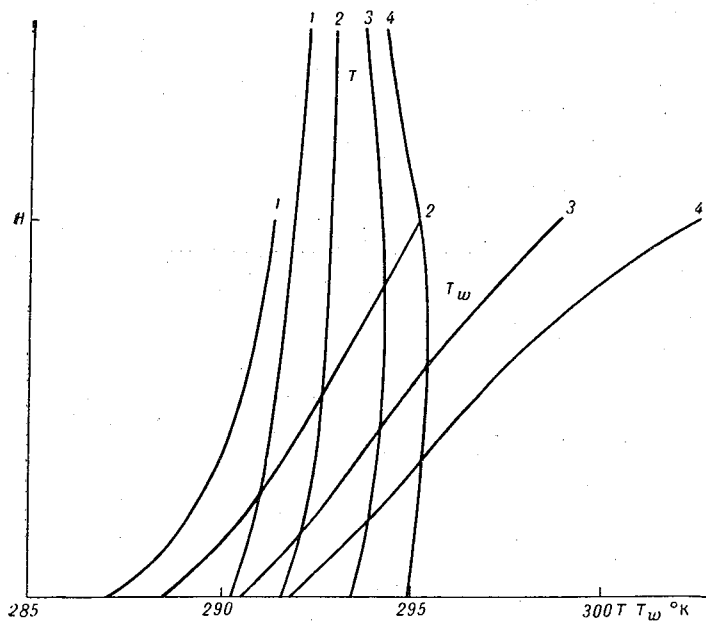


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воздуха межкостного пространства T и температуры поверхности фитомассы T_w при разных значениях R_{up} (кал $\cdot$ см $^{-2}$ $\cdot$ мин $^{-1}$).

1) $R_{up}=0,24$, 2) $0,48$, 3) $0,72$, 4) $0,96$.

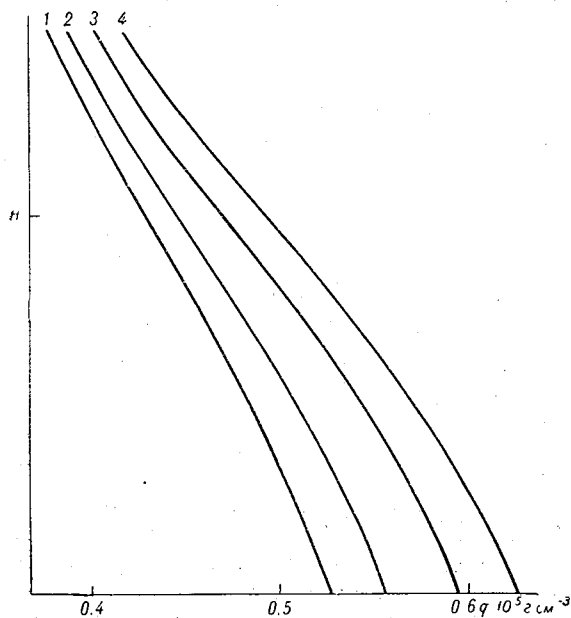


Рис. 3. Вертикальные профили влажности воздуха межкостного пространства q при разных значениях R_{up} (кал $\cdot$ см $^{-2}$ $\cdot$ мин $^{-1}$).

Усл. обозначения см. рис. 2.

Из рис. 2 видно также, что зависимость температуры биомассы от высоты гораздо более резкая по сравнению с $T(\lambda)$. Увеличение $R_{\text{ур}}$ приводит к росту T_w , особенно в верхних слоях растительности, и к сильному перепаду температуры листьев, расположенных соответственно на верхнем и нижнем уровнях в покрове. При этом характер зависимости $T_w(\lambda)$ иной, чем в случае $T(\lambda)$, в частности $T_w(\lambda)$ ни при каких λ не имеет экстремумов.

В связи с изложенными результатами следует отметить, что предположение о постоянстве температуры биомассы по высоте, которое делалось в некоторых работах (например, [1]), не выдерживает критики; скорее мало зависящей от высоты в растительности является температура воздуха.

Влажность воздуха межлистного пространства (рис. 3) заметно увеличивается с ростом $R_{\text{ур}}$, причем при заданном наборе параметров это увеличение наблюдается на всех уровнях в покрове. Рост q вызывается в первую очередь увеличением температуры биомассы T_w , которое через повышение q_w приводит к росту транспирации; интенсивная диффузия пара через устьичный просвет и является непосредственной причиной увеличения влажности воздуха межлистного пространства. Заметим, что при росте $R_{\text{ур}}$ от 0,24 до 0,96 кал·см⁻²·мин⁻¹ влагообмен почвы с воздухом меняет знак: происходит диффузия водяного пара в почву, что связано со спецификой постановки нашей задачи — постоянством q_s .

Упомянутые особенности поведения T , T_w и q определяют вертикальные профили удельных величин теплообмена $2sD_T(T_w - T)$ и транспирации $2sD_q(q_w - q)$ растительности (рис. 4). Тот факт, что при $R_{\text{ур}} = 0,24$ кал·см⁻²·мин⁻¹ температура воздуха межлистного пространства на всех уровнях выше температуры биомассы, является причиной поглощения тепла листьями, при этом суммарный теплообмен растительного покрова отрицателен (поток тепла $\Gamma_T(\lambda > H)$ над растительностью направлен вниз). При увеличении $R_{\text{ур}}$ кривая вертикального распределения удельного теплообмена переходит через нуль, и в растительном покрове можно выделить верхний слой, теплообмен которого положителен, и нижний, в котором $2sD_T(T_w - T)$ по-прежнему отрицателен. Теплоотдача верхнего слоя происходит более интенсивно, чем поглощение тепла в нижнем, что обеспечивает положительный суммарный теплообмен растительного покрова в целом, т. е. $\Gamma_T(\lambda > H) > 0$ (см. рис. 9).

Удельное испарение растет с увеличением $R_{\text{ур}}$ при всех λ (рис. 4), что вызывает рост суммарной транспирации (см. рис. 9), и в наших численных экспериментах даже при $R_{\text{ур}} = 0,24$ кал·см⁻²·мин⁻¹ $2sD_q(q_w - q)$ положительно на всех уровнях растительного покрова.

Вертикальные профили коэффициента турбулентной вязкости при перечисленных значениях $R_{\text{ур}}$ представлены на рис. 5. Естественно, что при довольно высоком выбранном значении скорости трения ($u_* = 30$ см·с⁻¹) градиенты температуры и влажности в межлистном пространстве, вызываемые ростом $R_{\text{ур}}$, не в состоянии существенно повлиять на режим турбулентности в раститель-

ности, характерные черты которого определяются динамическими факторами. Отличия в значениях коэффициента турбулентной вязкости в наших четырех случаях можно проследить лишь при $\lambda > H$; бóльшие k наблюдаются при бóльших R_{up} , когда температура воздуха над растительностью резко понижается с высотой (см. рис. 2).

Влияние приходящей к покрову солнечной радиации на скорость ветра в межлистном пространстве (рис. 6) практически отсутствует. Едва заметное уменьшение скорости над покровом при увеличении R_{up} связано с ростом коэффициента турбулентной вязкости при $\lambda > H$.

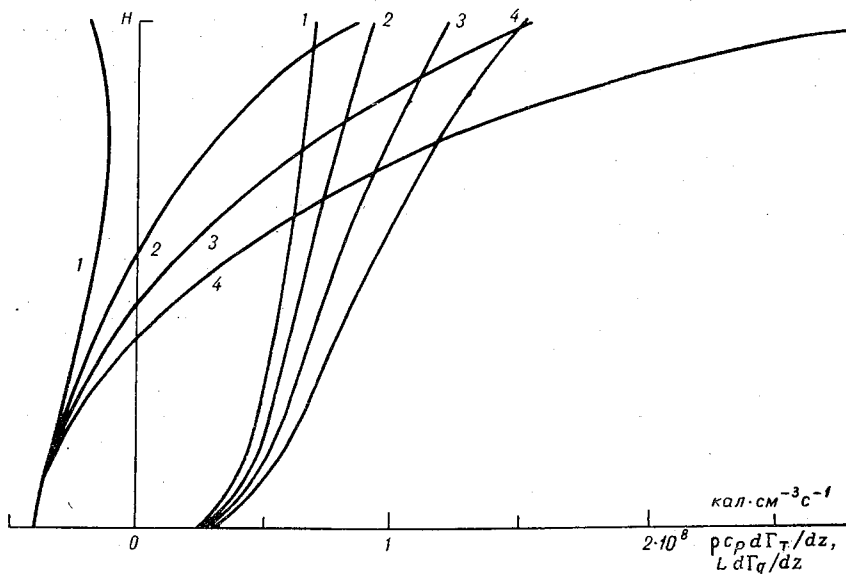


Рис. 4. Вертикальные профили удельного теплообмена и транспирации растительного покрова при разных значениях R_{up} ($\text{кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$).
Усл. обозначения см. рис. 2.

На рис. 7 представлены профили восходящего и нисходящего потоков тепловой радиации в растительности, соответствующие перечисленным четырем значениям R_{up} . Характерные черты этих зависимостей полностью определяются закономерностями вертикального распределения температуры биомассы. При бóльших R_{up} температура T_w выше на всех уровнях в покрове — относительно «холодное» противоизлучение атмосферы поглощается нагретыми листьями, которые излучают более «теплую» длинноволновую радиацию, что приводит к более резкому увеличению $I_{\downarrow}$ в верхнем слое растительности при бóльших R_{up} . Такой же механизм поглощения и излучения определяет и вид профиля восходящего потока в растительном покрове.

Интересна зависимость интегрального коэффициента теплообмена единицы поверхности листа от высоты (рис. 8). Поскольку

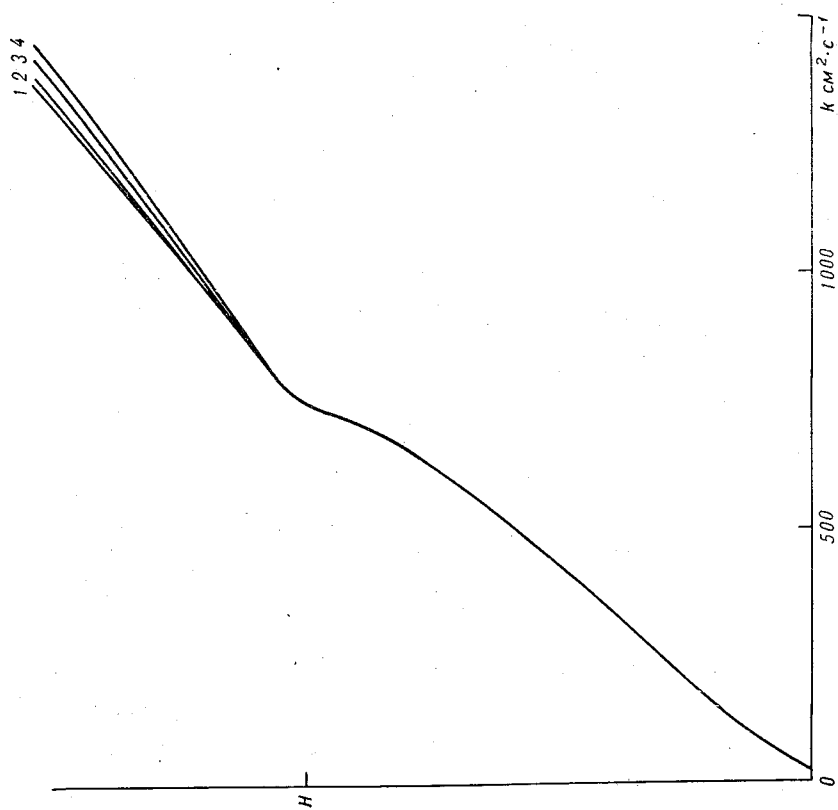


Рис. 5. Вертикальные профили коэффициента турбулентной вязкости в растительном покрове при разных значениях $R_{\text{ар}}$ ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$).
Усл. обозначения см. рис. 2.

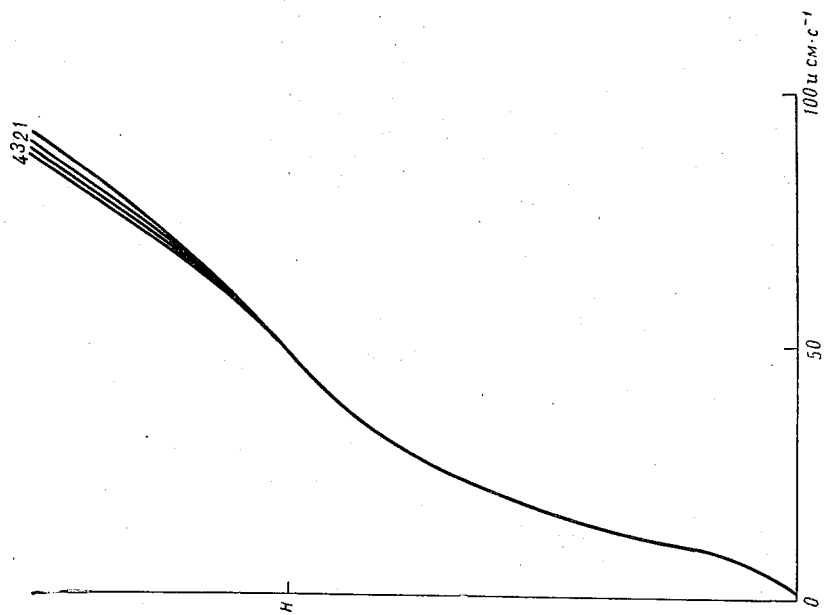


Рис. 6. Вертикальные профили скорости ветра в меж-
лиственном пространстве при разных значениях $R_{\text{ар}}$
($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$).
Усл. обозначения см. рис. 2.

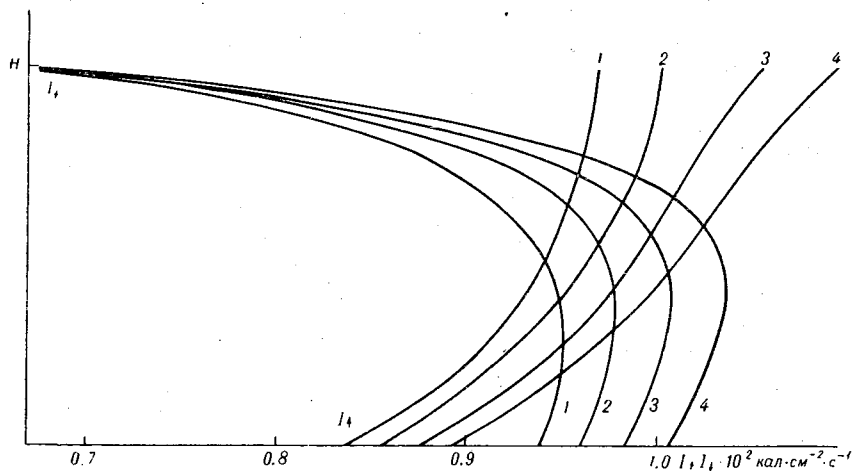


Рис. 7. Вертикальные профили восходящей $I_{\uparrow}$ и нисходящей $I_{\downarrow}$ тепловой радиации в растительном покрове при разных значениях R_{up} ($\text{кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$).

Усл. обозначения см. рис. 2.

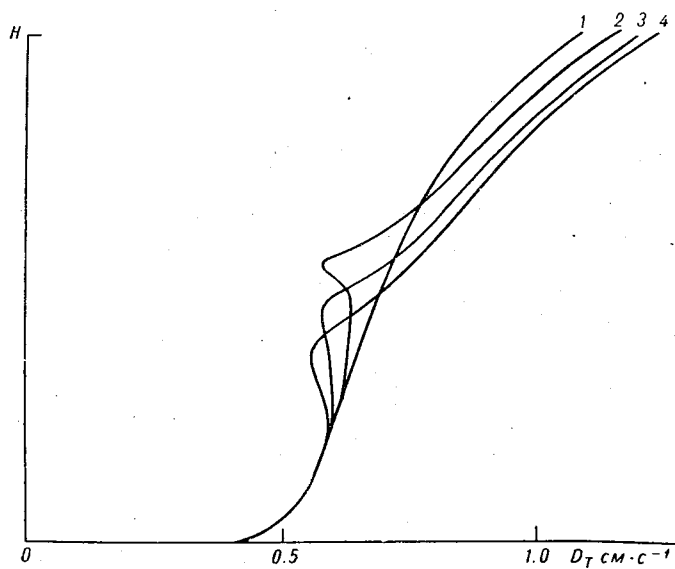


Рис. 8. Вертикальные профили коэффициента теплообмена воздух—лист при разных значениях R_{up} ($\text{кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$).

Усл. обозначения см. рис. 2.

теплообмен поверхности фитоэлементов обусловлен одновременным действием механизмов вынужденной и свободной конвекции и Nu_{free} зависит от абсолютной величины разности температур воздух—лист, при тех R_{up} , при которых на некоторой высоте наблюдается тепловое равновесие, профили $D_T(\lambda)$ имеют минимумы, приходящиеся именно на те λ , где $T=T_w$. В тех же случаях, когда на

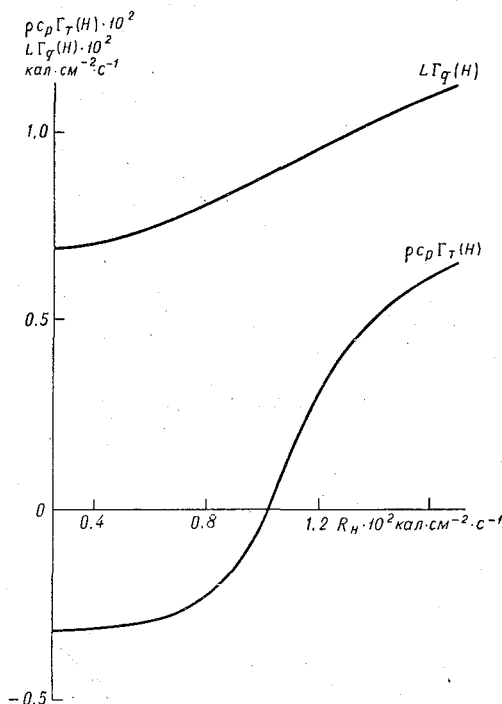


Рис. 9. Зависимость суммарного испарения и теплообмена растительного покрова от баланса коротковолновой радиации на верхней границе R_{up} .

всех уровнях в растительности существует различие в температуре воздуха и биомассы (при $R_{up}=0,24 \text{ кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$), экстремумов на $D_T(\lambda)$ нет.

На рис. 9 представлены расчетные зависимости турбулентных потоков тепла и влаги через верхнюю границу растительного покрова от величины R_{up} . Отметим здесь, что теплоотдача растительности посредством испарения значительно превосходит явный теплообмен.

6. Возможности использования разработанной модели метеорологического режима растительного покрова, конечно, не ограничиваются только рассмотренной задачей. Та формулировка, которая придана построенной модели, позволяет методом численных экспе-

риментов на ЭВМ провести исследование влияния на составляющие метеорологического режима любых из введенных фитометрических, физиологических и внешних метеорологических факторов. При этом замкнутость системы уравнений дает возможность проследить влияние каждого из интересующих нас факторов на весь комплекс характеристик метеорологического режима растительного покрова. Эти свойства разработанной модели наглядно демонстрируются приведенным примером.

Сопоставление полученных при модельном расчете и изученных в полевых условиях (см., например, [2, 12, 18, 20]) отдельных характеристик режима метеорологических элементов в растительности свидетельствует о том, что даже упрощенный вариант построенной модели довольно детально описывает реальные черты и закономерности метеорологического режима фитоценоза. Вместе с тем большинство агрометеорологических явлений, которые удастся обнаружить и изучить при помощи модельных построений, недостаточно исследовано или совсем не исследовано в натурных условиях; тогда как это дало бы возможность оценить справедливость некоторых выводов теории и помогло бы определить цели и задачи дальнейших модельных разработок.

Предложенная в настоящей статье количественная модель метеорологического режима фитоценозов при всей ее многофакторности еще не может считаться достаточной для физически корректного теоретического исследования жизнедеятельности растительных сообществ. Необходимое для этой цели исследование гидрологических явлений в корнеобитаемом слое почвы будет предпринято в дальнейшем и явится предметом следующей статьи, которая продолжит серию публикаций, посвященных теоретическим основам моделирования агрометеорологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асатуров М. Л. К теории водно-теплого режима растительного покрова.— «Труды ГГО», 1969, вып. 249, с. 65—71.
2. Ефимова Н. А. Основные особенности метеорологического режима на полях озимой пшеницы и озимой ржи.— «Труды ГГО», 1968, вып. 229, с. 23—36.
3. Зилитинкевич С. С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1970, 290 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. 3-е изд.-е. М., «Наука», 1965, 202 с.
5. Марунич С. В. Исследование структуры воздушного потока в условиях леса.— «Труды ГГО», 1972, вып. 282, с. 151—156.
6. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1965, 875 с.
7. Менжулин Г. В. К методике расчета метеорологического режима в растительном сообществе.— «Метеорология и гидрология». 1970, № 2, с. 92—99.
8. Менжулин Г. В. К теории стационарного метеорологического режима растительного покрова.— «Труды ГГО», 1972, вып. 297, с. 20—28.
9. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.—Л., Госэнергоиздат, 1947, 415 с.
10. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М., «Наука», 1965, 640 с.

11. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Ч. 2. М., «Наука», 1967, 680 с.
12. Раунер Ю. Л. Тепловой баланс растительного покрова. Л., Гидрометеоиздат, 1972, 210 с.
13. Росс Ю. К., Нильсен Т. А. Математическая модель радиационного режима растительного покрова.— В сб.: Актинометрия и оптика атмосферы. Таллин, «Валгус», 1968, с. 263—281.
14. Росс Ю. К., Нильсен Т. А. Расчет фотосинтетически активной радиации в растительном покрове.— В сб.: Режим солнечной радиации в растительном покрове. Тарту, изд. АН ЭстССР, 1968, с. 5—53.
15. Хинце И. О. Турбулентность. М., Физматгиз, 1963, 680 с.
16. Сипсо R. M. A mathematical model for air flow in a vegetative canopy. J. Appl. Met., 1965, vol. 4, No 4, p. 423—434.
17. Cowan I. R. Mass, heat and momentum exchange between stands of plants and their atmospheric environment. Quart. J. Royal Met. Soc., 1968, vol. 94, No 402, p. 523—544.
18. Lemon E. R. The measurement of height distribution of plant community activity using the energy and momentum balance approaches. In "Plant Environment and Efficient Water Use", UNESCO Symp. Proc., Copenhagen, Denmark, July 1965, p. 381—389.
19. Thom A. S. The exchange of momentum, mass and heat between an artificial leaf and the airflow in a wind tunnel. Quart. J. Royal Met. Soc., 1968, vol. 94, No 399, p. 96—107.
20. Uchijima L., Udagawa T., Horie T. and Kobayashi K. Studies of energy and gas exchange within crop canopies (8). Turbulent transfer coefficient and exchange velocity within a corn canopy.— J. Agricul. Met., 1970, vol. 25, No 4, p. 11—24.

О ПРИЛОЖЕНИЯХ ТЕОРИИ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Разработанная ранее физико-математическая модель водно-теплового режима растительного покрова [1, 2] позволяет рассчитывать характеристики режима в зависимости от внешних погодных условий и индивидуальных биофизических свойств растительности. При этом, помимо метеорологических и агрофизических параметров, характеризующих внешние условия, должны быть известны, в частности, коэффициент диффузионной проводимости устьиц D'' , зависящий от степени их раскрытия, и интегральная площадь листьев sH .

Поскольку степень раскрытия устьиц D'' меняется в широких пределах в зависимости от внешних погодных условий, то использование модели для конкретных метеорологических или климатических расчетов, а также для определения истинного влияния погодных факторов на водно-тепловой режим фитоценозов представляется в настоящее время затруднительным. Решение перечисленных задач требует привлечения дополнительных закономерностей, связывающих изменение метеорологических и агрофизических параметров с коэффициентом диффузионной проводимости устьиц D'' , т. е. закономерностей, которые на современном этапе развития агрометеорологии еще не известны.

Однако модель водно-теплового режима растительного покрова может быть использована не только для расчета характеристик режима при заданных значениях D'' и sH («прямая задача»), но и наоборот — для определения параметров D'' и sH , если известна какая-либо из интегральных характеристик водно-теплового режима («обратная задача»). В качестве таковой удобно использовать, например, величину суммарного испарения E_H , которая достаточно просто измеряется непосредственно или находится косвенным путем по разработанной методике [6, 7]. Обобщенные данные о географическом распределении E_H приведены в атласе теплового баланса [5].

Актуальность решения «обратной задачи» объясняется существенным влиянием D'' и sH на фотосинтез растительного покрова, его продуктивность.

Расчет влияния внешних погодных условий на фотосинтез и количественная оценка агроклиматических ресурсов возможны только в том случае, если известны, в частности, зависимости коэффициента диффузионной проводимости устьиц D'' от метеорологических и агрофизических факторов (см. [2, 3] и др.). Поэтому до тех пор, пока эти зависимости не будут найдены непосредственно в результате объединенных исследований биологов и агрометеорологов, большой интерес для решения перечисленных задач представляет косвенное определение значений параметров D'' и sH в зависимости от внешних условий при «обратном» использовании модели водно-теплового режима растительного покрова.

Если рассматриваются конкретный растительный покров и достаточно короткие отрезки времени, когда изменением sH можно пренебречь, то интегральную площадь листьев можно считать известной (так как методика ее измерения достаточно разработана — см. [9] и др.) и поставленная задача сводится к определению величины D'' при заданных значениях E_H и sH .

Задача эта, как будет показано, решается однозначно, но только благодаря тому, что параметр D'' в используемой модели (см. [1]) постоянен по высоте, или, другими словами, имеет смысл осредненной по высоте величины. Действительно, задание интегральной характеристики (E_H) не позволяет определить вертикальный профиль какой-либо из наших неизвестных величин ($D''(z)$ или $s(z)$), а позволяет найти лишь ее среднее значение.

В случае если возникает необходимость давать прогнозы о возможной продуктивности растений в определенных климатических условиях, характеризующихся, в частности, величиной суммарного испарения E_H , то мы не можем заранее сказать, какая сформируется в этих условиях интегральная площадь листьев покрова sH , так же как не можем заранее судить о том, какая в этих условиях будет степень раскрытия устьиц, т. е. величина D'' .

Поэтому, используя модель водно-теплового режима растительного покрова при заданном суммарном испарении, мы можем в общем случае получить лишь некоторую зависимость (для конкретных внешних условий) между осредненными по высоте параметрами D'' и sH , и только в том случае, если sH станет известно из результатов измерений или на изменения D'' и sH будет наложено дополнительное условие, мы сможем определить D'' и sH по отдельности.

Эта зависимость между параметрами D'' и sH , каждый из которых существенно влияет на фотосинтез зеленых растений, играет большую роль в теории продуктивности растительного покрова [2—4], и поэтому мы остановимся на этом вопросе подробнее.

Прежде всего отметим, что влияние параметра k_1 , характеризующего интенсивность турбулентного обмена в воздухе межлистного пространства, на решение «обратной задачи» аналогично, как и следовало ожидать, его влиянию на решение «прямой задачи», т. е. уже при достаточно малом турбулентном обмене ($k_1 > k_1^* \approx \approx 7$ см/с) наступает насыщение и дальнейшее увеличение k_1 прак-

тически не влияет на водно-тепловой режим [1, 2]. Это позволяет для приближенных расчетов рассматривать сильно вентилируемый растительный покров или так называемый случай турбулентного насыщения ($k_1 \rightarrow \infty$; $dq/dz=0$; $d\theta/dz=0$). При этом значительно облегчается решение системы уравнений, составляющих модель водно-теплого режима растительного покрова, и для определения D'' (как функции sH и остальных метеорологических и агрофизических параметров) путем соответствующих преобразований и интегрирования можно получить аналитические выражения:

$$D'' = \frac{1}{sH} \frac{\frac{1}{\rho} (E_H - E_0)}{\left[q_s(\bar{\theta}_w) - q_\infty \right] - \frac{E_H}{\rho D_H}}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_w = \theta_\infty + \frac{1}{\rho c_p} (R_H - B_0 - L E_H) \left(\frac{1}{D_H} + \frac{1}{D' sH} \right) - \\ - \frac{1}{\rho c_p} (R_0 - B_0 - L E_0) \frac{1}{D' sH}, \end{aligned} \quad (2)$$

где E_H и E_0 — суммарное испарение и испарение с почвы, R_H и R_0 — радиационный баланс на верхней и нижней границах растительного покрова, θ_∞ и q_∞ — температура и влажность воздуха над растительным покровом, D' и D_H — коэффициенты, характеризующие соответственно интенсивность теплообмена листьев и интенсивность турбулентного обмена в слое воздуха над растительностью, ρ и c_p — плотность и теплоемкость воздуха при постоянном давлении, L — скрытая теплота парообразования, $\bar{\theta}_w$ — средняя по высоте растительности температура листьев, $q_s(\bar{\theta}_w)$ — насыщающая влажность воздуха при температуре $\bar{\theta}_w$, которая может быть рассчитана по известной формуле Магнуса:

$$q_s(\bar{\theta}_w) = \tilde{q} \exp \left(\frac{a \bar{\theta}_w}{b + \bar{\theta}_w} \right); \quad (3)$$

$$(\tilde{q} = 3,79 \cdot 10^{-3}; \quad a = 17,1; \quad b = 235^\circ \text{C}).$$

В общем случае (k_1 не стремится к ∞) система уравнений, описывающих водно-тепловой режим растительного покрова, приводится к нелинейному интегральному уравнению, которое решалось численным методом на ЭВМ. На рис. 1 представлены в качестве примера зависимости между D'' и sH , полученные таким путем для двух различных сочетаний метеорологических — агрофизических параметров.

Отметим, что все зависимости, которыми связаны между собой D'' и sH , при различных значениях остальных параметров, лежащих в области их реальных значений, близки к гиперболическим, т. е. типа $D'' \approx \frac{1}{sH}$, но не полностью сводятся к таковым даже

в случае турбулентного насыщения, поскольку в формуле (1) $q_s(\bar{\theta}_w)$ хотя и слабо, но все же зависит от sH [см. (2) и (3)].

Если вид зависимостей D'' от sH для различных наборов метеорологических и агрофизических параметров практически один и тот же, то положение кривой $D''(sH)$ относительно осей координат, или, что то же самое, величина D'' при заданном sH , существенно опре-

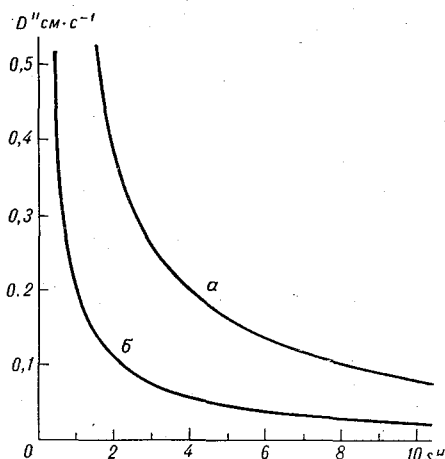


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузионной проводимости устьиц D'' от интегральной площади листьев sH при заданном суммарном испарении E_H в случаях а и б.

а) $E_H = 0,84 \cdot 10^{-5}$ г·см⁻²·с⁻¹; $R_H = 0,65 \times 10^{-2}$ кал·см⁻²·с⁻¹; $\theta_\infty = 19^\circ \text{C}$; $q_\infty = 8,4 \cdot 10^{-3}$ (г·г⁻¹); $E_0 = 0,22 \cdot 10^{-5}$ г·см⁻²·с⁻¹; $B_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ кал·см⁻²·с⁻¹. б) $E_H = 0,34 \cdot 10^{-5}$ г·см⁻²·с⁻¹; $R_H = 0,68 \times 10^{-2}$ кал·см⁻²·с⁻¹; $\theta_\infty = 22^\circ \text{C}$; $q_\infty = 9,2 \cdot 10^{-3}$ (г·г⁻¹); $E_0 = 0,08 \cdot 10^{-5}$ г·см⁻²·с⁻¹; $B_0 = 0,3 \cdot 10^{-3}$ кал·см⁻²·с⁻¹.

парения E_H : чем больше E_H , тем больше D'' при заданном sH (или тем больше sH при заданном D'') и фиксированных внешних условиях. Такое поведение модели, как нам кажется, не нуждается в особом пояснении — оно полностью вытекает из физических закономерностей водно-теплового режима растительного покрова, согласно которым суммарная отдача влаги листьями и соответственно E_H будет тем больше, чем больше диффузионная проводимость устьиц D'' , через которые происходит испарение, и чем больше влагообменная поверхность sH . Этим же объясняется и близкая к обратной пропорциональности зависимость между D'' и sH при заданном E_H (см. рис. 1).

Что же касается влияния остальных метеорологических и агрофизических параметров на $D''(sH)$, то здесь необходимо отметить,

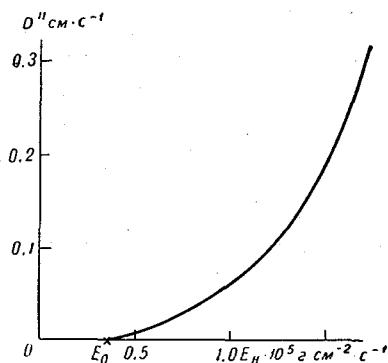


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузионной проводимости устьиц D'' от суммарного испарения E_H .

деляется набором упомянутых параметров (рис. 1).

Влияние на величину D'' (при заданном sH) каждого из метеорологических и агрофизических параметров проиллюстрировано на рис. 2—7.

Как следует из рис. 2, большое влияние на расположение $D''(sH)$ относительно осей координат оказывает величина суммарного ис-

что воздействие каждого из них (при заданных E_H и sH — см. рис. 3—7) противоположно его влиянию на величину суммарного испарения E_H (при заданных значениях sH и D''). Смысл этого явления достаточно ясен: если какой-либо параметр влияет на водно-тепловой режим таким образом, что E_H увеличивается (уменьшается) с его увеличением при заданных значениях D'' и sH , то соответственно при заданном E_H увеличение этого параметра должно приводить к уменьшению (увеличению) D'' или sH , поскольку только таким путем может быть обеспечено постоянство величины

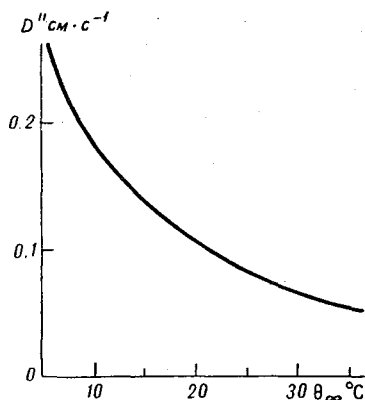


Рис. 3. Зависимость коэффициента диффузионной проводимости устьиц D'' от температуры воздуха над растительностью θ_∞ при заданном суммарном испарении.

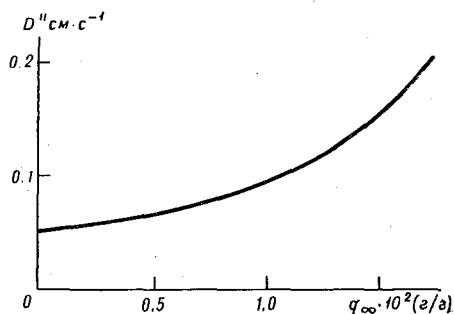


Рис. 4. Зависимость коэффициента диффузионной проводимости устьиц D'' от влажности воздуха над растительностью q_∞ при заданном суммарном испарении.

суммарного испарения при прочих равных условиях.

Так, зависимости, приведенные на рис. 3 и 4, показывают, что на характеристики водно-теплого режима, в частности на суммарное испарение E_H , сильное влияние оказывают метеорологические условия над растительным покровом — температура θ_∞ и влажность воздуха q_∞ . Чем больше θ_∞ и меньше q_∞ , тем больше E_H при заданных D'' и sH , и, наоборот, тем меньше D'' при заданных E_H и sH .

Если уменьшение величины суммарного испарения с возрастанием q_∞ может быть легко объяснено уменьшением градиента влажности воздуха на верхней границе растительного покрова, то факт возрастания E_H с увеличением θ_∞ менее нагляден и объясняется увеличением температуры листьев, что в свою очередь вызывает увеличение насыщающей влажности воздуха внутри устьичных полостей листьев и соответственно возрастание транспирации.

Существенное влияние на водно-тепловой режим растительного покрова оказывает и влагообмен почвы с воздухом, т. е. почвенная составляющая суммарного испарения. Чем больше испарение с почвы E_0 при заданном суммарном испарении E_H , чем меньше влаги могут транспирировать растения, тем меньше раскрыты устьица и меньше коэффициент их проводимости (рис. 5).

Большое значение для водно-теплового режима имеют факторы, влияющие на распределение солнечной энергии в растительном покрове. Чем больше разность между радиационным балансом на верхней границе покрова и потоком тепла в почву ($R_H - B_0$), т. е. чем больше солнечной энергии поглощает растительный покров и подстилающая поверхность, преобразуя ее в тепловую энергию, тем больше E_H при заданных D'' и sH или тем меньше D'' при заданных E_H и sH (рис. 6). Если же увеличивается разность между радиационным балансом на нижней границе покрова и потоком тепла в почву ($R_0 - B_0$), т. е. если увеличивается количество солнечной энергии, которое расходуется на испарение и турбулентную тепло-

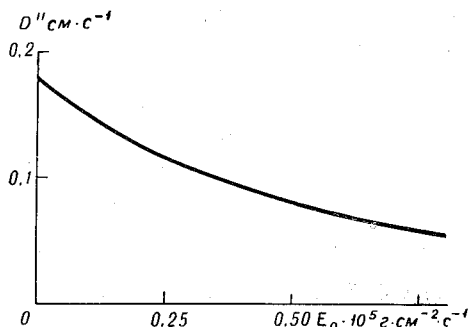


Рис. 5. Зависимость коэффициента диффузионной проводимости устьиц D'' от величины потока влаги из почвы E_0 при заданном суммарном испарении.

отдачу почвы, то E_H уменьшается при заданных D'' и sH или увеличивается D'' при заданных E_H и sH (рис. 7).

Кроме параметров D'' и sH , зависимость между которыми находится по изложенной методике, из модели водно-теплового режима при заданном суммарном испарении определяется также и осредненная температура листьев $\bar{\theta}_w$, формирующаяся под воздействием внешних условий и, подобно D'' и sH , существенно влияющая на фотосинтез растительного покрова.

Рассматривая для наглядности случаи турбулентного насыщения, нетрудно показать, что на $\bar{\theta}_w$ в основном влияет температура воздуха над растительностью θ_∞ (см. (2)). Что же касается радиации, поглощаемой растительностью ($R_H - R_0$), и затрат тепла на испарение влаги листьями $L(E_H - E_0)$, то при реальных значениях k_1 , D' и D_H влияние ($R_H - R_0$) и $L(E_H - E_0)$ на температуру листьев малó; как показывают результаты расчетов, отклонения $\bar{\theta}_w$ от θ_∞ в обычных условиях не превышают 2—3°. Это объясняется не только интенсивным теплообменом листьев с окружающим их воздухом, но и тем, что нагревание листьев за счет поглощения радиации в значительной мере компенсируется затратами тепла на транспирацию.

Как отмечалось, из решения задачи в общей постановке мы находим $\bar{\theta}_w$, так же как и D'' , в виде функции интегральной площади листьев sH . Однако из (2) следует, что температура листьев, в отличие от D'' , слабо зависит от величины sH в области реальных значений интегральной площади листьев (1—15).

Основная трудность, встречающаяся при практическом использовании изложенной методики нахождения функций $D''(sH)$

и $\bar{\theta}_w$ (sH), состоит в определении величины испарения с почвы E_0 . Измерение E_0 затруднительно, а закономерности изменения этой величины мало изучены. Предложенная в работе [4] упрощенная методика позволяет оценить величину E_0 при известном суммарном испарении E_H по данным о запасах продуктивной влаги в почве. Однако точность такой оценки невелика, и эта методика нуждается в дальнейшем усовершенствовании.

Величина радиационного баланса на нижней границе покрова R_0 может быть достаточно просто рассчитана независимым путем по данным о величинах поступающей из атмосферы длинноволновой и коротковолновой радиации при известных биофизических свойствах растительности по ослаблению радиации [8].

Остальные необходимые параметры, характеризующие внешние условия, — θ_∞ , q_∞ , E_H , R_H , B_0 — могут быть найдены в результате стандартных метеорологических наблюдений, а для климатологических расчетов получены из материалов многолетних наблюдений, представленных в климатических справочниках и атласе теплового баланса.

Что же касается коэффициентов D_H и D' , характеризующих соответ-

ственно интенсивность турбулентного обмена в слое воздуха над растительностью и интенсивность теплоотдачи листьев, то путем численных экспериментов показано, что в области реальных значений этих коэффициентов ($D_H > D_H^* \approx 7 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$; $D' > D'^* \approx 5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$) их влияние на водно-тепловой режим мало. Это обстоятельство позволяет при расчетах D'' и $\bar{\theta}_w$ использовать приближенные оценки коэффициентов D_H и D' .

Таким образом, изложенная в настоящей работе методика позволяет найти зависимости диффузионной проводимости устьиц D'' и средней температуры листьев $\bar{\theta}_w$ от интегрального листового индекса sH для конкретных метеорологических или климатических

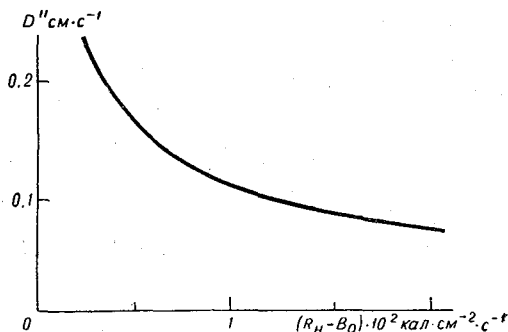


Рис. 6. Зависимость коэффициента диффузионной проводимости устьиц D'' от разности $(R_H - B_0)$ при заданном суммарном испарении.

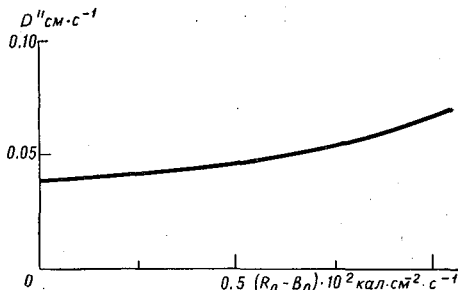


Рис. 7. Зависимость коэффициента диффузионной проводимости устьиц D'' от разности $(R_0 - B_0)$ при заданном суммарном испарении.

условий. Возможности использования этих зависимостей, играющих важную роль в теории фотосинтеза растительного покрова, имеют самостоятельное значение и будут рассмотрены в следующих публикациях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асатуров М. Л. К теории водно-теплового режима растительного покрова.— «Труды ГГО», 1969, вып. 249, с. 65—71.
2. Асатуров М. Л. Влияние водного и теплового режима на продуктивность растительного покрова.— «Труды ГГО», 1970, вып. 263, с. 107—114.
3. Асатуров М. Л., Ефимова Н. А., Менжулин Г. В. К вопросу о количественной оценке агроклиматических ресурсов.— «Метеорология и гидрология», 1971, № 8, с. 80—86.
4. Асатуров М. Л. К вопросу о влиянии водно-теплового режима на продуктивность растительности.— «Труды ГГО», 1971, вып. 287, с. 101—106.
5. Атлас теплового баланса земного шара. Под ред. М. И. Будыко. М., 1963.
6. Будыко М. И. Испарение в естественных условиях. Л. Гидрометеониздат, 1948, 136 с.
7. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Л. Гидрометеониздат, 1956, 254 с.
8. Менжулин Г. В. К теории стационарного метеорологического режима растительного покрова.— «Труды ГГО», 1972, вып. 297, с. 20—28.
9. Росс Ю. К. К вопросу определения листовой поверхности растений.— В сб.: Фитоактинометрические исследования растительного покрова. Таллин, «Валгус», 1967, с. 150—161.

К МЕТОДИКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования фотосинтеза имеют давнюю и замечательную историю. Всем сколько-нибудь значительным открытиям и достижениям учение о фотосинтезе обязано именно экспериментам. Характерно и то, что все теоретические построения в науке о фотосинтезе, сформулированные до сих пор, являются по существу синтетическими, апостериорными, т. е. сделанными путем собирания и обобщения данных отдельных достоверных экспериментальных исследований.

Такой путь теоретических построений в фундаментальных отраслях учения о фотосинтезе, которые ответственны за выявление первопричин фотосинтетических превращений, является сейчас, пожалуй, единственно возможным, так как любые абстрактные предсказания здесь могут иметь законную силу лишь после выяснения микроструктуры и свойств фотосинтетического аппарата на молекулярном, органоидальном и клеточном уровнях.

Вместе с тем сейчас усиленно развивается и другое направление в науке о фотосинтезе — моделирование фотосинтетической деятельности фитоценозов. Способы исследования, которые применяются в работах этого направления, значительно отличаются от первого направления. Здесь основную роль, с нашей точки зрения, уже может и должен играть дедуктивный метод.

Построение моделей фотосинтеза фитоценозов должно было происходить следующим образом. Отправным моментом при попытке описать суммарный фотосинтетический эффект жизнедеятельности фитоценозов должно было быть, и это так и случилось, постулирование закономерностей фотосинтеза отдельных фотосинтезирующих единиц. Этими единицами могли быть уже достаточно сложно организованные молекулярные и клеточные конструкции. Так, например, фотосинтезирующей единицей для моделей продуктивности фитоценозов могли служить хлоропласты отдельной клетки или некоторый комплекс пигментов, составляющий хлоропласты, способный осуществлять полный цикл фотосинтетических превращений *in vivo*. В грубых моделях этими единицами могут быть даже листья.

В таких случаях для описания закономерностей поглощения субстратов фотосинтетической реакции — квантов фотосинтетически активной радиации (ФАР) и молекул углекислого газа — следует исходить из результатов исследования ассимиляционной активности отдельных фотосинтезирующих единиц. Эти результаты для моделей продуктивности должны поставлять экспериментальные разработки, проводящиеся в сфере фундаментального направления науки о фотосинтезе.

Усвоение результатов экспериментов фундаментального направления в целях моделирования суммарного фотосинтеза фитоценозов происходило до настоящего времени достаточно успешно. Так, эмпирические данные о закономерностях кинетики фотосинтеза — зависимости скорости фотосинтетической реакции от концентраций субстратов — были с успехом использованы в модельных построениях.

Вместе с этим уже наступил такой этап в теоретическом моделировании фотосинтеза фитоценозов, когда потенциальные возможности теоретических моделей не полностью используются из-за недостаточной ясности отдельных деталей фотосинтетических превращений. Это, в частности, относится к взаимосвязи процессов фотосинтеза и дыхания. Отмеченные неясности вызваны принципиальными методическими трудностями, возникающими при постановке тщательных биохимических и физиологических экспериментов, но они, несомненно, будут преодолены по мере прогресса способов лабораторного экспериментирования.

Мы не будем более касаться вопроса взаимоотношений фундаментального экспериментального направления в биохимии и физиологии фотосинтеза и теоретического моделирования жизнедеятельности фитоценозов, так как эти взаимоотношения ясны и, с нашей точки зрения, не нуждаются в сколь-нибудь значительной перестройке.

Так вот, если ассимиляционные и дессимиляционные способности отдельных фотосинтезирующих единиц заданы, то, вообще говоря, задача о фотосинтезе фитоценоза является задачей диффузии — переноса субстратов к местам их поглощения в растениях.

Ассимиляционные и дессимиляционные способности фотосинтезирующих единиц значительно зависят от их микроклимата, другими словами, от локальных условий их окружения. Но и задача расчета микроклимата в растительности также является в общем случае задачей переноса метеорологических характеристик. Сейчас же в связи со значительными успехами теории переноса различных субстанций в разных средах (в частности, метеорологических — в турбулентной среде) проблема режима любой характеристики в фитоценозе может быть решена с использованием абстрактно-теоретического метода.

В настоящее время существует еще одно направление в экспериментировании, так или иначе примыкающее к науке о фотосинтезе. Здесь имеются в виду натурные исследования закономерностей продуктивности и жизнедеятельности конкретных растительных со-

обществ. Основная доля в такого рода экспериментах приходится на агрометеорологические и микроклиматические наблюдения в растительности. Упомянутое направление стало развиваться раньше, чем появились первые работы по моделированию, и поэтому ко времени появления моделей продуктивности выработало определенные методические правила. Ввиду отсутствия в то время полностью строгого физического основания, на котором должно было строиться любое обобщение данных натурных измерений, агрометеорологи по необходимости ограничились построением эмпирических апостериорных зависимостей.

Сейчас, несмотря на разработку моделей продуктивности и метеорологического режима в растительном покрове, многие агрометеорологические наблюдения в фитоценозах проводятся по методике, выработанной в зависимости главным образом от целей, интересов и вкусов отдельных исследователей.

С нашей точки зрения, подобное положение дел в этой отрасли науки о фотосинтезе, которая ответственна за разработку теории продуктивности фитоценозов, не может способствовать успешному ее продвижению.

Здесь мы попытаемся осветить основные положения, используемые при моделировании агрометеорологических явлений, и выработать требования и рекомендации к основам методики натурального экспериментирования в этой отрасли. Требования будут сформулированы при обсуждении нужд одной частной теоретической модели метеорологического режима и продуктивности, нужд, требуемых верификацией ее выводов.

Вначале коснемся некоторых рекомендаций к эксперименту, следующих из модели метеорологического режима растительного покрова, предложенной в [7, 8].

Наиболее серьезное требование к эксперименту, поставленному с целью проверки выводов из модельных построений, состоит в том, что такой эксперимент должен быть комплексным. Так мы будем называть экспериментальное исследование, в котором предполагаются наблюдения над всеми или же наиболее важными факторами, формирующими метеорологический режим фитоценоза. К числу этих факторов отнесем следующие.

1. *Внешние метеорологические факторы.* Скорость ветра, температура и влажность воздуха, высота солнца, поток прямой радиации и нисходящий поток коротковолновой рассеянной радиации, противоизлучение атмосферы. Эти измерения должны быть поставлены на достаточном удалении от верхней границы растительности, например на высоте, равной трем высотам растительного покрова.

2. *Почвенные факторы.* Мозаичность строения температурного поля поверхности почвы требует оценки: температуры участков поверхности почвы, находящихся в солнечных и теневых пятнах, кондуктивного потока тепла, испарения из солнечного и теневого пятна. Измерения этих характеристик должны быть проведены при сохранении той фитометрической структуры растительности, которая характерна для проводимого эксперимента.

3. *Фитометрические параметры ценоза.* Высота растительности, вертикальный профиль удельной деятельности поверхности и какая-либо из линейных характеристик листьев, характерная форма листа. По возможности следует также измерить: вертикальную зависимость функции распределения нормалей к поверхности листьев, коэффициенты отражения и поглощения листьев для коротковолновой и тепловой радиации, вертикальную зависимость радиуса стеблей растений, модули упругости стебля и черенка листа.

В общем случае по известным значениям всех перечисленных параметров (или по возможности большинства из них) модель позволяет рассчитать вертикальные профили следующих характеристик метеорологического режима растительного покрова:

- скорости ветра,
- коэффициента турбулентности,
- масштаба турбулентности,
- вихревой энергии,
- температуры воздуха межлистного пространства,
- влажности воздуха межлистного пространства,
- температуры листьев, находящихся в солнечном и теневом пятнах,
- восходящих и нисходящих потоков коротковолновой и тепловой радиации.

Возможность верификации выводов из модельных построений будет обеспечена, если иметь данные экспериментальных измерений профилей перечисленных компонентов метеорологического режима растительного покрова.

Ясно, что влияние входных параметров модели сильно зависит от условий формирования метеорологического режима и далеко не одинаково проявляется на закономерностях разных его характеристик. Так, в условиях явно выраженной вынужденной конвекции на первые три из перечисленных профилей могут влиять сколь-нибудь значительно лишь скорость ветра над растительностью и некоторые из ее фитометрических параметров [8]. Но положение будет иным в случае малых скоростей ветра, когда вихревой режим в межлистном пространстве должен определяться температурными и влажностными неоднородностями.

Конечно, при постановке экспериментов следует позаботиться о репрезентативности полученных результатов в смысле соблюдения условия горизонтальной однородности исследуемого режима, но так как этот вопрос подробно освещен в [9], на нем останавливаться не будем.

Понятно, что проведение полного комплекса микрометеорологических измерений может вызвать определенные технические трудности, особенно на первых этапах подобного экспериментирования. Поэтому сейчас большие надежды следует возлагать на корректно поставленные частные эксперименты, которые дали бы возможность проверить лишь некоторые выводы модельных построений, касающиеся метеорологического режима растительного покрова. При постановке таких частных исследований необходимо позаботиться

о том, чтобы наблюдения проводились в условиях, когда действие нефиксируемых в эксперименте параметров сводится к нулю или мало. Например, не может считаться корректным и полезным эксперимент, в котором наблюдается профиль ветра в межлистном пространстве, если фиксируется лишь суммарный листовой индекс, а не вертикальная фитометрическая структура растительного покрова. Поэтому в каждом конкретном случае при постановке частных экспериментов следует оценить наиболее физически значимые факторы, влияющие на формирование наблюдаемых характеристик [8].

Одна из частных интерпретаций модели метеорологического режима растительного покрова использована при построении схемы расчета продуктивности растительного покрова [1, 2]. В этой схеме из подробного рассмотрения закономерностей водно-теплового режима растительности делаются выводы относительно закономерностей устьичной регуляции испарения, непосредственно влияющей на газообмен и продуктивность.

Использование построенной модели в климатологических целях, для задачи расчета ресурсов продуктивности, предполагает определение суммарного листового индекса S и вместе с этим среднего эффективного коэффициента проводимости устьиц D . Для этого используется вариационный принцип максимума продуктивности, из которого выводится соотношение, замыкающее задачу [2].

В сфере влияния водно-теплового режима находится и температура биомассы, от которой сильно зависят биофизические константы, входящие в часть модели продуктивности, описывающую газообмен растительного покрова. Подробнее о свойствах этой модели продуктивности сказано в [1].

Требования к натурным исследованиям, которые должны быть поставлены с целью проверки выводов модели продуктивности, сформулируем, предварительно рассмотрев одно из проведенных сравнений результатов, полученных экспериментально и теоретически.

Одним из наиболее удачно поставленных экспериментальных наблюдений характеристик метеорологического и газового режимов в агроценозе, с нашей точки зрения, являются экспедиционные исследования, проведенные сотрудниками ГГО летом 1966 г. в Ленинградской области на посеве озимой ржи [4]. Эти эксперименты включали комплекс градиентных метеорологических наблюдений [5], фиксировалась вегетационная динамика фитометрических характеристик [6], измерялись потоки приходящей коротковолновой радиации и, что, пожалуй, самое важное, регистрировалась суточная динамика суммарного газообмена растительного покрова [3], которая является основной расчетной величиной модели продуктивности.

Главным недостатком этих экспериментов является отсутствие данных о величине почвенной составляющей суммарного испарения E_0 , знание которой дало бы возможность рассчитать продуктивную составляющую суммарного испарения, вызванную транспирацией растений. Эта величина в основном и определяет эффективное

значение коэффициента диффузной проводимости устьиц D . Для оценки величины испарения с почвы нам пришлось прибегнуть к довольно грубой косвенной оценке с использованием данных градиентных наблюдений температуры и влажности воздуха на двух нижних уровнях в растительном покрове. Это, естественно, не смогло обеспечить желательную точность и привело к ошибкам при определении E_0 и соответственно D , причем ошибки при определении D тем

больше, чем больше E_0 , которое, как правило, выше в первую половину дня и особенно в утренние часы.

Для сопоставления экспериментальных данных и теоретических оценок было выбрано три дня наблюдений, в которые наиболее полно представлены результаты измерений дневной динамики потоков CO_2 из атмосферы и почвы, а также динамики наблюдаемых метеорологических элементов. Эти дни, кроме того, достаточно отличались друг от друга средними значениями суммарного газообмена P .

Полученная из экспериментальных наблюдений динамика P за отрезок времени от 10 до 18 ч для выбранных дней представлена на рис. 1 сплошными линиями. Величины P , наблюдаемые до 10 ч, не рассматривались ввиду отсутствия для

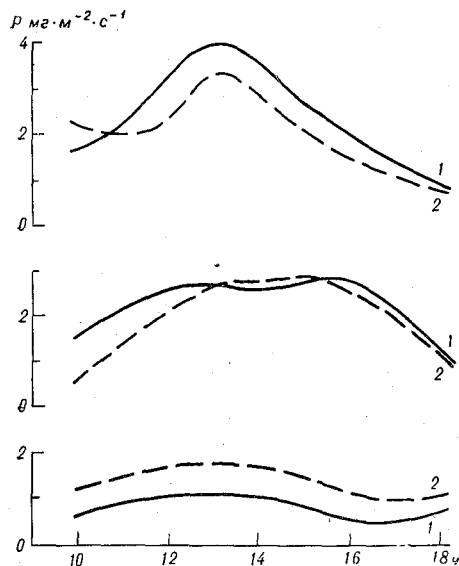


Рис. 1. Дневная динамика суммарной ассимиляции растительным покровом.

1 — экспериментальные данные, 2 — теоретически рассчитанные величины.

этого периода удовлетворительных экспериментальных данных по транспирации; позднее (после 18 ч) потоки углекислоты не измерялись.

Кривые суммарного газообмена, полученные путем расчета по модели, показаны на том же рисунке прерывистыми линиями.

Можно отметить вполне удовлетворительное количественное согласование дневной динамики газообмена (экспериментальной и теоретической). Особенно хорошее согласование во всех трех случаях наблюдается во второй половине дня. Большее расхождение теоретических и экспериментальных кривых в левой части объясняется, по-видимому, отмеченным возрастанием ошибок при определении величины D в первой половине дня.

Лучшего согласования, пожалуй, нельзя было ожидать и не только из-за систематических ошибок при определении E_0 , но и потому, что для расчетов использовались приближенные значения некоторых физиологических параметров, входящих в модель. Точные

значения этих параметров, необходимые для проведения детального согласования, должны были быть получены экспериментально. Здесь следует также упомянуть и о повышении точности и корректности измерений потоков углекислоты и метеорологических характеристик.

Требования и рекомендации к эксперименту, поставленному с целью проверки выводов из модельных построений, логически вытекают из проведенного в работах [1, 7, 8] рассмотрения физических закономерностей метеорологического режима и режима продуктивности, а также иллюстрируются прокомментированным частным случаем сравнения. Ниже мы перечислим эти рекомендации.

Прежде всего, кроме измерения уже перечисленных входных параметров модели метеорологического режима, для верификации выводов модели продуктивности необходимо регистрировать следующие натурные характеристики.

1. *Суммарное испарение растительности.* Знание этой величины и испарения с поверхности почвы позволит рассчитать важнейшую фитометрическую характеристику — коэффициент диффузной проводимости устьиц.

Поток прямой и рассеянной фотосинтетически активной радиации (ФАР) над растительным покровом. Коэффициенты поглощения и рассеяния листьев для ФАР.

2. *Поток углекислого газа из почвы.*

3. Особо следует упомянуть о желательности получения *зависимостей физиологических параметров, входящих в схему расчета продуктивности, от условий произрастания.* К их числу относятся коэффициенты диффузной проводимости протоплазмы клетки и растворимости в ней углекислого газа, параметры углекислотной и световой зависимости фотосинтеза, а также интенсивность дыхания. Проведение полного сравнения требует установления не только характерных значений упомянутых величин, но и их зависимостей от внешних условий (в частности, от температуры), вида растения и от фазы развития фитоценоза.

Здесь надлежит заметить следующее. В рассматриваемую модель расчета продуктивности пока еще не включены факторы почвенного минерального питания. Как известно, недостаток элементов минерального питания, используемых при биосинтетических превращениях через механизмы регуляции, приводит к уменьшению скорости ассимиляции углекислоты, т. е. формально изменяет кинетические зависимости фотосинтеза. Таким образом, величины кинетических констант в конкретных условиях *in vivo* могут значительно отличаться от таковых, полученных в лабораторных условиях или в условиях, отличных по уровню минерального питания от конкретно наблюдаемых.

Модель продуктивности при известных значениях этих и некоторых других из ранее перечисленных параметров дает возможность рассчитать суммарную ассимиляцию углекислого газа фитоценоза, определяющую в конце концов его продуктивность.

Поэтому для более детального сравнения теории и эксперимента при экспериментировании следует регистрировать именно эту величину.

Конечно, мгновенная съемка микрометеорологического и углекислотного режима растительного покрова может вызвать определенные трудности технического характера, особенно при проведении наблюдений за суммарным газообменом. В таком случае можно представить себе эксперимент квазистационарного по режиму продуктивности типа, когда фиксация потоков углекислоты заменяется измерениями сухих приростов биомассы за определенный промежуток времени. Отметим, что и в этом случае временная динамика факторов окружения должна быть детально зафиксирована.

При изложении требований и рекомендаций к эксперименту мы совсем не касались деталей технического характера, так как обсуждение таковых не входит в нашу компетенцию. Техническая реализация сформулированных рекомендаций должна решаться отдельно каждым исследователем и зависит главным образом от его возможностей.

Выполнение требований, изложенных в настоящей статье, позволит с максимальной эффективностью использовать результаты экспериментальных исследований и наметить пути конкретизации модельных агрометеорологических построений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асатуров М. Л. Влияние водного и теплового режима на продуктивность растительного покрова.—«Труды ГГО», 1970, вып. 263, с. 107—114.
2. Асатуров М. Л., Ефимова Н. А., Менжулин Г. В. К вопросу о количественной оценке агроклиматических ресурсов.—«Метеорология и гидрология», 1971, № 8, с. 80—86.
3. Гиршович Ю. Е., Кобак К. И. Исследование фотосинтетической деятельности агрофитоценоза.—«Труды ГГО», 1968, вып. 229, с. 48—62.
4. Ефимова Н. А. Полевые исследования метеорологического режима растительного покрова.—«Труды ГГО», 1968, вып. 229, с. 4—6.
5. Ефимова Н. А. Основные особенности метеорологического режима на полях озимой пшеницы и озимой ржи.—«Труды ГГО», 1968, вып. 229, с. 23—36.
6. Купченко Г. С. Некоторые биометрические характеристики озимых культур.—«Труды ГГО», 1968, вып. 229, с. 7—22.
7. Менжулин Г. В. К теории стационарного метеорологического режима растительного покрова.—«Труды ГГО», 1972, вып. 297, с. 20—28.
8. Менжулин Г. В., Циприс И. Б. О закономерностях трансформации приземного потока в растительности. См. настоящий сборник. с. 59—67.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ПОЛОС

Лесные полезащитные полосы препятствуют возникновению ветровой эрозии почв. Если же перенос почвенных или снежных частиц все-таки происходит, то лесные полосы способствуют отложению переносимого ветровым потоком материала. Эти свойства лесной полосы определяются ее воздействием на структуру турбулентного приземного потока воздуха [1, 2] и зависят от элементов конструкции полосы: ее высоты, ширины, продуваемости.

Некоторые общие закономерности обтекания лесной полосы потоком воздуха установлены из натуральных наблюдений по ослаблению скорости ветра на различном расстоянии за лесными полосами разных конструкций [2, 5]. Однако изменение турбулентных характеристик потока за лесными полосами в натуральных экспериментах не исследовалось; недостаточно развивались и методы математического и физического моделирования процесса взаимодействия лесной полосы и приземного потока воздуха.

В данной статье рассматривается математическое моделирование такого процесса.

Взаимодействие лесной полезащитной полосы с приземным потоком воздуха (свободным от примесей или содержащим взвешенные частицы) представляет собой гидродинамическую задачу развития турбулентного пристенного (роль стенки выполняет поверхность почвы) течения несжимаемой одно- или двухфазной среды при наличии препятствия заданных геометрических размеров и продуваемости. Там, где влияние препятствия становится пренебрежимо малым, гидродинамические характеристики потока определяются исключительно (для однофазного течения) величинами динамической скорости, температурной стратификации и шероховатости поверхности почвы.

В общем случае рассматриваемая задача является трехмерной и нестационарной. В качестве естественного допущения можно принять, что задача плоская: вектор скорости потока перпендикулярен лесной полосе, а сама полоса является достаточно протяженной и

однородной в направлении, перпендикулярном плоскости xOy , в которой лежит вектор скорости (ось y направлена вертикально вверх, а ось x лежит на поверхности почвы — рис. 1). Действительно, установлено [5], что отклонение направления ветра на $\pm 30^\circ$ от перпендикулярного к лесной полосе слабо влияет на защитный эффект.

Более спорным является вопрос о возможности пренебрежения зависимостью всех гидродинамических характеристик от времени. Во-первых, порывистость ветра может создать ситуацию, резко отличную от картины обтекания лесной полосы стационарным потоком; во-вторых, при наличии в воздухе достаточного количества взвешенных частиц и их выпадении на землю форма поверхности почвы является функцией времени. Однако если ветровой поток свободен от примеси (или концентрация ее мала) и характеристики

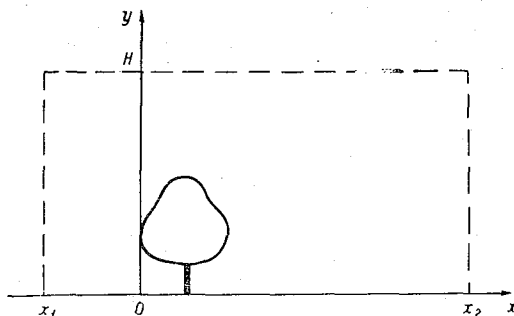


Рис. 1. К постановке задачи.

ветра в течение некоторого (не слишком малого) промежутка времени остаются постоянными, то рассмотрение квазистационарного приближения представляется вполне допустимым.

Итак, направим вектор скорости ветра перпендикулярно лесной полосе и рассмотрим плоскую квазистационарную задачу обтекания лесной полосы приземным турбулентным потоком воздуха, причем ограничимся пока случаем однофазного течения.

В пренебрежении вязкими молекулярными силами, уравнение движения Рейнольдса для такой задачи запишется (в проекциях на оси координат x и y соответственно) в виде [6]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (-\overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\overline{u'v'}), \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (-\overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\overline{v'^2}). \quad (2)$$

Здесь u , v — соответственно горизонтальная и вертикальная компоненты средней скорости потока; $-\overline{u'^2}$, $-\overline{u'v'}$, $-\overline{v'^2}$ — компоненты тензора турбулентных напряжений; p — среднее давление; ρ — плотность воздуха; f_x , f_y — плотность внешних массовых сил, спроектированных на оси x , y соответственно.

Присутствие элементов растительности в потоке воздуха обуславливает появление силы сопротивления, которая направлена против вектора средней скорости потока и для малого объема $d\tau$ равна по величине

$$c_f \frac{\rho V^2}{2} d\Sigma,$$

где c_f — коэффициент сопротивления элементов растительности; $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ — величина вектора средней скорости потока; $d\Sigma$ — площадь обтекаемых элементов растительности, заключенных в $d\tau$.

Массовая плотность этой силы равна

$$c_f s V^2 / 2,$$

где $s = d\Sigma/d\tau$ — удельная поверхность элементов растительности.

Таким образом,

$$\begin{aligned} f_x &= -c_f s \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{2}, \\ f_y &= -c_f s \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{2} - g, \end{aligned} \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения.

Кроме уравнений (1) и (2), компоненты средней скорости связаны между собой соотношением неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

Система уравнений (1), (2), (4) содержит шесть неизвестных величин: две компоненты средней скорости, давление и компоненты тензора турбулентных напряжений $-\overline{u'^2}$, $-\overline{v'^2}$, $-\overline{u'v'}$. Для замыкания системы уравнений (1), (2), (4) можно воспользоваться концепцией, выдвинутой Колмогоровым [7] и Прандтлем и широко используемой в настоящее время для построения методов расчета турбулентных течений. Согласно этой концепции, локальные свойства турбулентного течения могут быть описаны всего двумя величинами: кинетической энергией пульсационного движения b и масштабом турбулентности l . Если предположить еще, что между тензором турбулентных напряжений и тензором скоростей деформаций существует линейная зависимость, то компоненты тензора турбулентных напряжений можно выразить следующим образом:

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} b \delta_{ij} - l \sqrt{b} \Phi_{ij}, \quad (5)$$

где $\Phi_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i$ — симметричный тензор скоростей деформации; δ_{ij} — символ Кронекера; $i, j = 1, 2$.

Для кинетической энергии пульсационного движения Колмогоровым [7] предложено дифференциальное уравнение, которое

в случае квазистационарного плоскостного течения имеет вид

$$u \frac{\partial b}{\partial x} + v \frac{\partial b}{\partial y} = \text{diff} + \text{tr} + \text{diss}, \quad (6)$$

где члены в правой части означают диффузию пульсационной энергии, трансформацию энергии среднего движения в пульсационную и диссипацию кинетической энергии турбулентных пульсаций в тепло.

Если пренебречь переносом турбулентной энергии за счет молекулярной диффузии и пульсаций давления, то можно записать [7]:

$$\text{diff} = - \frac{\partial}{\partial x} \overline{b' u'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{b' v'}. \quad (7)$$

Трансформационный член в (6) нужно записать, согласно [6] и [7], в виде

$$\text{tr} = - \overline{u'^2} \frac{\partial u}{\partial x} - \overline{u' v'} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \overline{v'^2} \frac{\partial v}{\partial y} + c_f s \frac{V^3}{2}. \quad (8)$$

Последний член в правой части этого уравнения представляет собой ту часть энергии среднего движения, которая переходит в пульсационную под действием генератора турбулентности — элементов растительности лесной полосы.

Диссипация турбулентной энергии может быть выражена через величины b и l на основании соображений размерности:

$$\text{diss} = -c_1 b^{3/2} / l, \quad (9)$$

где c_1 — безразмерный коэффициент пропорциональности.

Чтобы определить неизвестные величины $\overline{b' u'}$ и $\overline{b' v'}$ в уравнении (7), полагают [6] по аналогии с (5), что

$$\overline{b' u'_i} = -\alpha_b l \sqrt{\overline{b}} \partial b / \partial x_i, \quad (10)$$

где α_b — безразмерный коэффициент пропорциональности.

Остается определить масштаб турбулентности l . Дифференциальное уравнение для l было предложено Ротта [10], однако применить его без большого числа допущений не представляется возможным. Заслуживает внимания предложение, сделанное в работе [3], исходя из которого дифференциальное уравнение для масштаба l записывается в каноническом виде (как общее эллиптическое уравнение, к которому можно привести и уравнение баланса пульсационной энергии). Относительно источников члена этого уравнения делаются специальные предположения (см. [3]).

Можно также попытаться использовать обобщение гипотезы Кармана, предложенное Лайхтманом и Зилитинкевичем [4] для температурно-стратифицированного пограничного слоя атмосферы и с успехом примененное Менжулиным [6] для задач, связанных с метеорологическим режимом в растительном сообществе.

Система уравнений (1), (2), (4), (6), дополненная соотношениями (5), (7)—(10) и тем или иным уравнением для масштаба турбулентности l , а также соответствующими граничными условиями, полностью определяет квазистационарное двумерное течение турбулентного приземного потока воздуха, возмущенное наличием проницаемого препятствия типа лесной полезащитной полосы, для случая нейтральной термической стратификации атмосферы и при отсутствии в потоке примесей.

Наша система уравнений является системой эллиптического типа; корректной задачей для нее является краевая задача в замкнутой области. В качестве такой области можно взять прямоугольник в плоскости xOy (рис. 1) со сторонами, параллельными координатным осям. Если сечения x_1 и x_2 выбрать достаточно далеко от препятствия [по данным экспериментов это расстояние перед полосой должно составлять $(3 \div 5)h_2$, за полосой — $(30 \div 50)h_2$; h_2 — высота полосы], то в этих сечениях можно задать характеристики не возмущенного препятствием потока; высота H прямоугольника должна быть такой, чтобы влияние препятствия уже не сказывалось на метеорологических характеристиках пограничного слоя.

Влияние температурной стратификации можно учесть, добавив к описанной ранее системе уравнений уравнение конвективного теплообмена и введя соответствующий член в уравнение баланса пульсационной энергии, что подробно описано, например, в [6].

Задача значительно усложняется, если лесную полосу обтекает двухфазный (например, пылевоздушный) поток. Во-первых, концентрация примеси в приземном слое (особенно у самой поверхности почвы) может быть настолько велика, что необходимо учитывать воздействие примеси на несущую жидкость, т. е. видоизменить уравнения движения и баланса пульсационной энергии. Во-вторых, осаждение пылеватых частиц в больших количествах вызывает изменение формы поверхности почвы, что приводит к нестационарности задачи. Наконец, физические процессы, приводящие к подъему почвенных частиц (если речь идет о ветровой эрозии) и их взаимодействию между собой и поверхностью почвы, исследованы недостаточно. В случае когда концентрация примеси и размеры частиц, ее составляющих, достаточно малы, для описания процесса распространения примеси можно использовать диффузионную модель, согласно которой движение частиц примеси не оказывает воздействия на динамические характеристики потока, а концентрация твердой фазы (для двумерного квазистационарного течения) подчиняется уравнению [13]

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} l \sqrt{b} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} l \sqrt{b} \frac{\partial w}{\partial y} + a_1 \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (11)$$

где w — объемная концентрация примеси; a_1 — гидравлическая крупность частиц примеси.

Для проверки изложенной в настоящей статье математической модели обтекания лесной полосы приземным потоком воздуха была

численно проинтегрирована следующая система уравнений:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} k \frac{\partial u}{\partial y} - c_f s \frac{u^2}{2},$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (12a)$$

$$u \frac{\partial b}{\partial x} + v \frac{\partial b}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \alpha_b k \frac{\partial b}{\partial y} + k \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + c_f s \frac{u^3}{2} - \frac{c_1 b^2}{k}, \quad k = l \sqrt{b},$$

$$\frac{1}{l} = - \frac{1}{\kappa c_1^{1/4}} \frac{\partial / \partial y (b/k)}{b/k} + \frac{s}{a}, \quad (12b)$$

где κ — постоянная Кармана; a — безразмерный коэффициент пропорциональности. Граничными условиями были:

при $x=0$

$$u = -\frac{v_*}{\kappa} \ln \frac{y+y_0}{y_0}, \quad v=0;$$

$$k = \kappa v_* (y+y_0); \quad b = c_1^{-1/2} v_*^2;$$

при $y=0$

$$u=v=0, \quad \alpha_b k \partial b / \partial y = 0, \quad l = \kappa c_1^{1/4} y_0;$$

при $y=H$

$$k \partial u / \partial y = v_*^2, \quad \alpha_b k \partial b / \partial y = 0. \quad (13)$$

В этих выражениях $v_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ — динамическая скорость; τ_0 — касательное напряжение в приземном слое; y_0 — параметр шероховатости; значение координаты $x=0$ соответствует началу препятствия.

Система уравнений (12a) значительно упрощена по сравнению с исходной системой уравнений (1)—(2)—(4)—(6); она получена из последней путем отбрасывания членов, описывающих горизонтальный градиент давления, горизонтальный турбулентный обмен и горизонтальную диффузию энергии турбулентности, что является существенным ограничением и фактически означает, что мы рассматриваем хорошо продуваемую полосу. В качестве уравнения для масштаба турбулентности использована формула (12b), выражающая гипотезу Лайхтмана—Зилитинкевича [4] и дополненная членом s/a , ограничивающим масштаб турбулентности в растительности [6]. При задании профилей характеристик потока в сечении $x=0$ исходим из предположения, что достаточно продуваемое препятствие мало искажает поток на входе.

На рис. 2 и 3 приведены соответственно профили горизонтальной скорости и коэффициента вихревой вязкости (h_1 — высота нижней части деревьев, лишенной сучьев и листьев; L — ширина полосы). Обсуждение полученных результатов не входит в задачи настоящей

статьи; ограничимся лишь утверждением, что сравнение профилей, полученных в результате решения упрощенной системы уравнений (12), с данными натурных наблюдений [5] и экспериментов в метеорологической трубе [9] говорит о жизнеспособности предлагаемой модели даже в первом приближении. Таким образом, можно надеяться, что метод расчета, основанный на решении полной системы уравнений (1)–(2)–(4)–(6) с привлечением подходящей

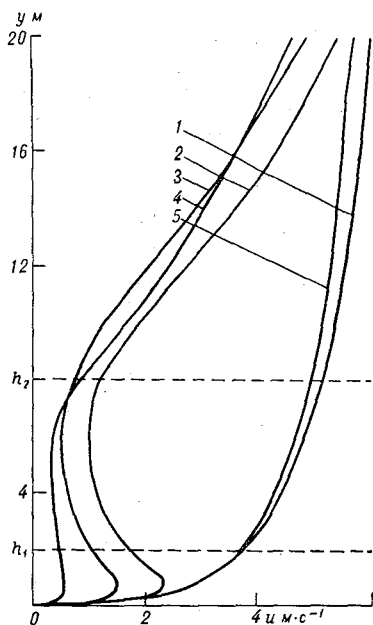


Рис. 2. Профили горизонтальной скорости (полоса продуваемой конструкции; $h_1=2$ м, $h_2=8$ м, $L=16$ м) при разных значениях x .

1) $x=0$, 2) 4 м, 3) 8 м, 4) 16 м, 5) 640 м.

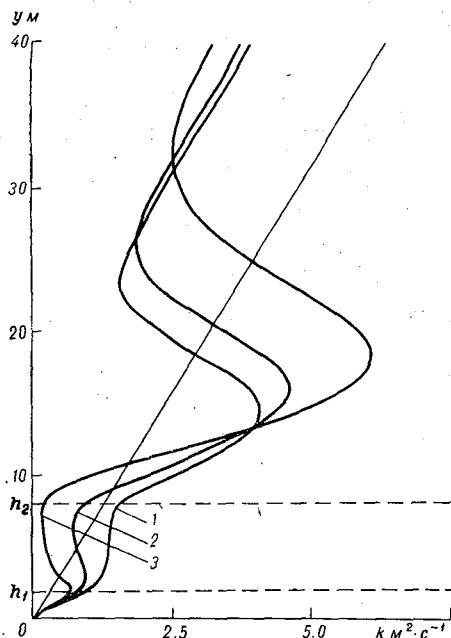


Рис. 3. Профили коэффициента вихревой вязкости ($x=8$ м) при разных значениях s .

1) $s=0,35$ м⁻¹, 2) 0,5 м⁻¹, 3) 1 м⁻¹.

гипотезы относительно масштаба турбулентности, позволит разрешить поставленную задачу: определение метеорологических характеристик приземного потока воздуха в лесной полосе и пространстве за нею и расчет оптимальных конструкций лесных полезащитных полос.

Следует в заключение отметить, что численное решение нелинейной эллиптической системы уравнений (1)–(2)–(4)–(6) не представляется в настоящее время безнадежным делом, хотя и сопряжено с известными математическими трудностями и большими затратами машинного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М. И. К постановке экспериментальных исследований метеорологической эффективности ползащитных лесных полос.— «Труды ГГО», 1952, вып. 29 (91), с. 105—113.
2. Бяллович Ю. П. Новые данные о влиянии ползащитных полос на скорость ветра.— «Метеорология и гидрология», 1939, № 4, с. 95—103.
3. Госмен А. Д. и др. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М., «Мир», 1972, с. 256.
4. Зилитинкевич С. С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1970, 290 с.
5. Константинов А. Р., Струзер Л. Р. Лесные полосы и урожай. Л., Гидрометеиздат, 1965, 174 с.
6. Менжулин Г. В. Физические основы метеорологического режима растительного покрова. Автореф. канд. диссерт. Л., 1970, 17 с.
7. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М., «Наука», 1965, 640 с.
8. Юдин М. И. Влияние лесных полос на турбулентный обмен и оптимальная ширина полос.— В сб.: Вопросы гидрометеорологической эффективности ползащитного лесоразведения. Л., Гидрометеиздат, 1950, с. 40—43.
9. Meroney R. N. Characteristics of wind and turbulence in and above model forests.— J. Appl. Met., 1968, vol. 7, No 5, p. 780—788.
10. Rotta J. C. Statistische Theorie nichthomogener Turbulenz, 2. Z. für Physik, 1951, Bd. 131, Nr 1, S. 51—57.

Г. В. МЕНЖУЛИН, И. Б. ЦИПРИС

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ПОТОКА В РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Теперь можно считать признанным, что изучение агрометеорологических явлений методом математического моделирования дает принципиальную возможность решить многие практически важные задачи. Это, конечно, в полной мере относится и к теоретическим моделям, разработанным для исследования закономерностей важнейшего агрометеорологического процесса — формирования продуктивности фитоценозов.

Вовлечение в модельные построения все большего количества факторов, влияющих на жизнедеятельность и продуктивность растительности, обеспечило выявление многих до сих пор неизученных деталей совокупного агрометеорологического процесса. Однако развитие математического моделирования не может быть полностью успешным до тех пор, пока не разработана удовлетворительная методика натурных исследований в фитоценозах, методика, приспособленная для экспериментальной проверки выводов из модельных построений. Сейчас существует заметный недостаток экспериментальных данных такого сорта, и заметно отстает разработка конструкций современных агрометеорологических приборов.

В связи с необходимостью усугубления практической направленности физико-математических моделей продуктивности в настоящее время некоторые научные коллективы и отдельные исследователи планируют проведение больших и широко поставленных экспериментов по выявлению режима функционирования агроценозов и, в частности, по исследованию влияния различных внешних факторов на продуктивность растительности. С этой целью предполагается, например, выделение отдельных небольших земельных участков, на которых в натурных условиях будут проводиться экспериментальные исследования закономерностей режима продуктивности посевов различных сельскохозяйственных культур.

Большое место в подобных комплексных экспериментах должны занять наблюдения микрометеорологического режима как над растительностью, так и внутри ее. Естественно, что результаты таких наблюдений будут связываться с выводами из теоретических работ по моделированию метеорологического режима растительного

покрова, так как подобные модели являются частью комплексных моделей продуктивности. Для того чтобы сделать теоретические и экспериментальные выводы сравнимыми, при постановке экспериментов следует позаботиться о соответствии условий, в которых они будут проводиться, исходным предпосылкам, сделанным при модельных построениях и касающимся этих же условий.

Так, во всех развитых до сих пор теориях метеорологического режима растительного покрова делается предположение о горизонтальной однородности растительности. Поэтому выводы, следующие из модельных построений, следует применять к достаточно горизонтально протяженным насаждениям. В связи с этим возникают следующие вопросы.

1. Как далеко от границ насаждения должны проводиться измерения профилей характеристик метеорологического режима, чтобы обеспечить заданную точность в смысле удовлетворения предположения о горизонтальной однородности?

2. Каковы должны быть размеры отдельных участков растительности, к которым могут быть применены выводы из теоретической модели?

3. Каковы закономерности трансформации характеристик метеорологического режима растительного покрова по мере удаления от его границ?

Конечно, ответы на эти вопросы можно получить и проведя ряд измерений характеристик метеорологического режима при различном удалении от границ насаждения, однако такой эксперимент сопряжен со значительными трудностями: необходимо иметь в виду, что для поставленной цели следует исследовать разные типы насаждений, влияние на многие исследуемые характеристики таких факторов, как высота, густота и вертикальная структура растительности.

Вместе с этим сейчас после успешной разработки модели турбулентного течения в приземном слое при наличии растительности [1] имеется возможность ответить на поставленные вопросы, используя теоретическое решение задачи о трансформации приземного воздушного потока при натекании его на растительный покров.

В работах [2, 3] была предложена методика расчета динамических характеристик приземного турбулентного потока для случая обтекания проникаемого для воздуха препятствия и проведены некоторые численные эксперименты, касающиеся обтекания лесных защитных полос. Разработанная методика предполагает совместное решение:

а) уравнения движения

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial u}{\partial z} - c_w S u^2;$$

б) уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0;$$

в) уравнения переноса вихревой энергии

$$u \frac{\partial b}{\partial x} + w \frac{\partial b}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \alpha_b k \frac{\partial b}{\partial z} + k \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + c_w s u^3 - \frac{b^{3/2}}{cl};$$

г) соотношения для масштаба турбулентности

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{s}{d} - \frac{1}{\psi} \frac{d\psi}{dz} \right),$$

$$\psi = \frac{k^2}{cl^4};$$

д) равенства

$$k = l \sqrt{b}$$

с граничными условиями
при $x=0$

$$u = \frac{u_*}{\alpha} \ln \frac{z+z_0}{z_0}, \quad w=0,$$

$$k = \alpha u_* (z+z_0), \quad b = c^{1/2} u_*^2;$$

при $z=0$

$$u=w=0, \quad \alpha_b k \partial b / \partial z = 0,$$

$$l = \alpha c^{-1/4} z_0;$$

при $z=H$

$$k \partial u / \partial z = u_*^2, \quad \alpha_b k \partial b / \partial z = 0.$$

Условные обозначения, принятые в этих выражениях, соответствуют таковым в [3].

Заметим, что сформулированная модель является «плоской», т. е. предполагается, что не существует переноса каких-либо субстанций параллельно боковой границе растительности (вдоль оси y).

Здесь мы не будем повторять тех ограничений и предпосылок, которые сделаны при выводе уравнений и граничных условий используемой модели: весь комментарий, относящийся к возможности использования выписанных соотношений для решения задачи обтекания лесной полосы однофазным приземным потоком при нейтральной термической стратификации [2, 3], может быть отнесен и к нашему случаю.

Схематическое изображение исследуемого объекта — приграничного участка растительности — представлено на рис. 1, где показаны и направления системы координат, в которых решается задача.

Ниже приводятся некоторые результаты численных экспериментов по сформулированной модели, анализ которых позволяет ответить на поставленные ранее вопросы, касающиеся закономерностей режима турбулентного течения в приграничной части горизонтально однородного растительного покрова. Расчеты проведены для случая

растительности высотой h , равной 1 м; высота H , на которой ставилось верхнее граничное условие, выбиралась равной 50 м.

Возможное влияние вертикального распределения листовой поверхности на характеристики трансформации вихревого течения требует проведения расчетов при широком варьировании величины и профиля площади удельной деятельной поверхности листы, которая определяет продуваемость растительности. Серия численных

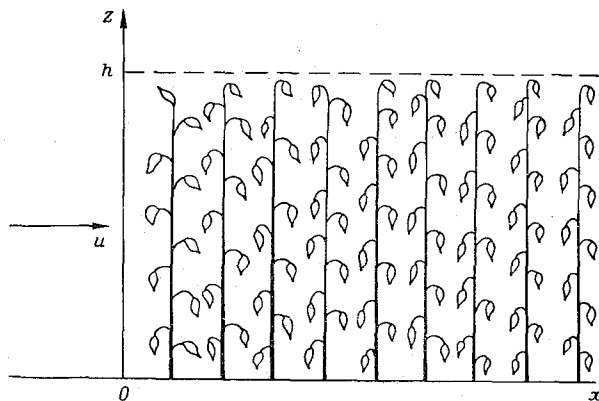


Рис. 1. К постановке задачи.

экспериментов, проведенных в целях настоящего исследования, включала расчеты для 12 случаев s :

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1) $s=0,01 \text{ см}^{-1}$, | 7) $s=0,07 \text{ см}^{-1}$, |
| 2) $s=0,02 \text{ см}^{-1}$, | 8) $s=0,08 \text{ см}^{-1}$, |
| 3) $s=0,03 \text{ см}^{-1}$, | 9) $s=10^{-3}z \text{ см}^{-1}$, |
| 4) $s=0,04 \text{ см}^{-1}$, | 10) $s=1,5 \cdot 10^{-5}z^2 \text{ см}^{-1}$, |
| 5) $s=0,05 \text{ см}^{-1}$, | 11) $s=10^{-3}(100-z) \text{ см}^{-1}$, |
| 6) $s=0,06 \text{ см}^{-1}$, | 12) $s=1,5 \cdot 10^{-5}(100-z) \text{ см}^{-1}$. |

На рис. 2 (а—г) приведены вертикальные профили горизонтальной компоненты u скорости ветра при разных x (различном удалении от «входа» в насаждение) для растительных покровов с распределением удельной деятельной поверхности по высоте для случаев 5, 9 и 11. Интегральный листовой индекс растительности

$\int_0^h s dz$ для этих трех случаев одинаков и равен 5.

Показательно, что основные черты вертикального профиля скорости u , характерные для каждого из типов распределения $s(z)$, проявляются сразу после «входа» в насаждение: взаимное расположение кривых $u(z)$ практически не изменяется по мере роста x . На расстоянии 2 м от «опушки» насаждения ($x=2$) у поверхности почвы наблюдаются еще заметно увеличенные значения скорости по сравнению с величинами u ; например, при $x=16$ м ветер

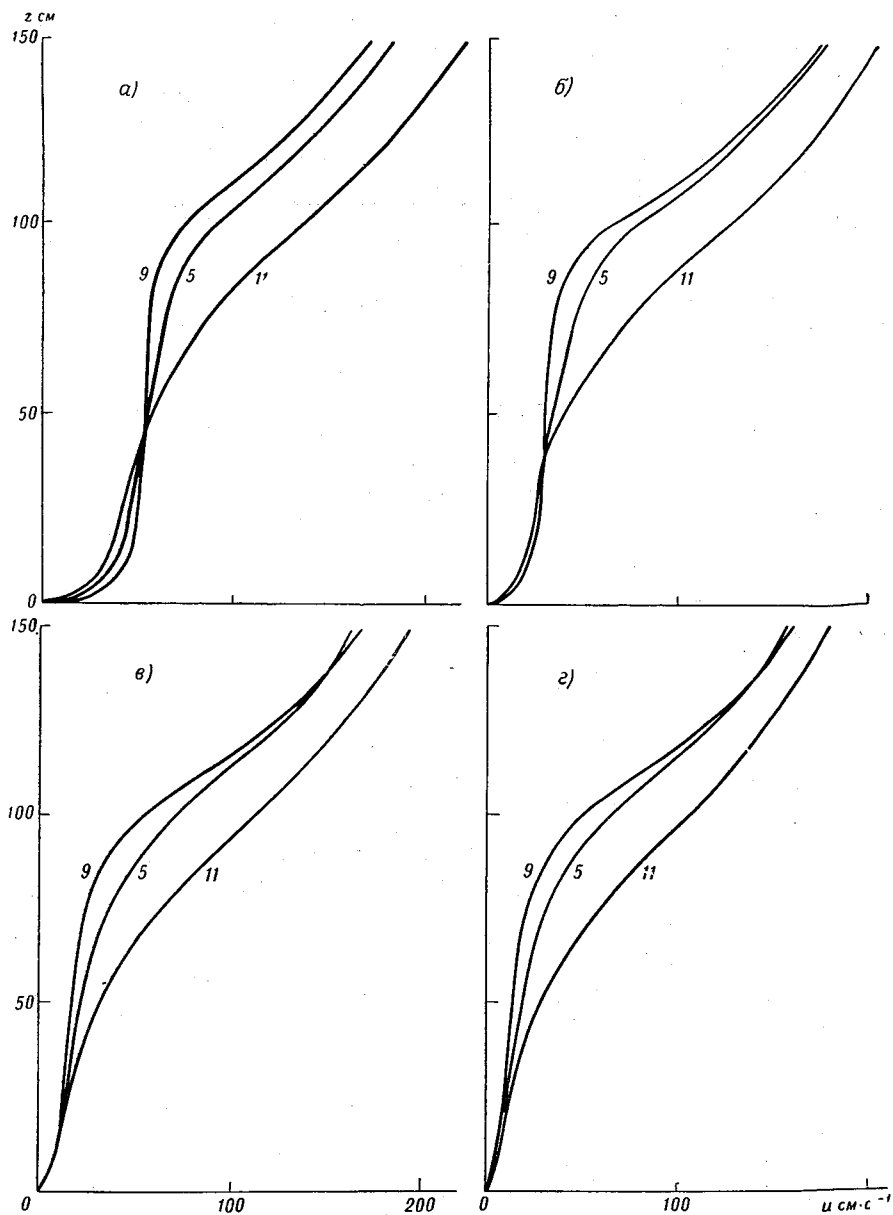
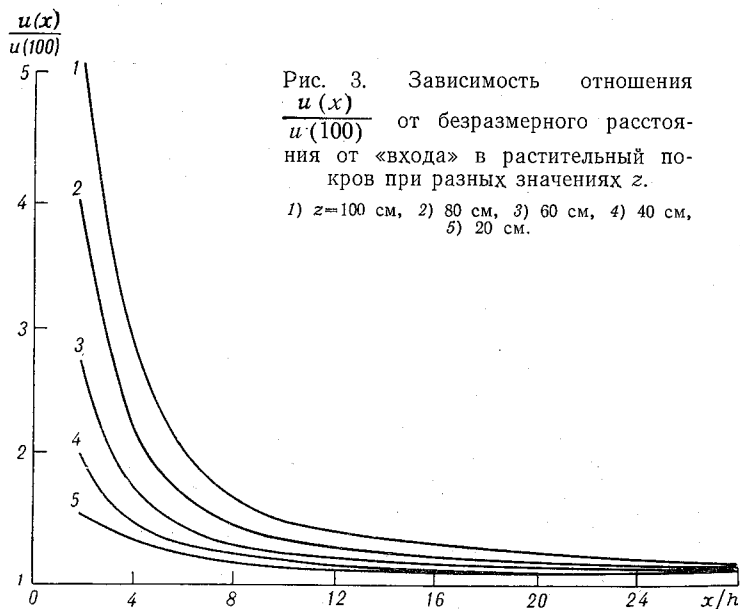


Рис. 2. Вертикальные профили горизонтальной скорости на различном удалении x от «входа» в насаждение.

а) $x=2$ м, б) 4 м, в) 8 м, г) 16 м.

«поддувает» под насаждение. Эффект «поддувания» сильнее должен быть выражен в том случае, когда плотность листвы на нижних уровнях в растительности мала или равна нулю. Кстати, это можно проследить на графиках $u(z)$, приведенных в [2, 3], для лесной полосы, не имеющей листвы в нижней своей части. В нашем эксперименте этот эффект более всего проявляется в случае растительного покрова типа 9, когда z увеличивается с высотой.

В случае 11 горизонтальная скорость растет с высотой быстрее, чем в растительном покрове с постоянной или растущей по высоте действительной поверхностью, и это характерно для насаждения в целом, в том числе и для его приграничных участков.



На всех высотах в растительности горизонтальная скорость спадает по мере увеличения x , поток массы через сечения $x=\text{const}$ уменьшается, линии тока вытесняются из слоя растительного покрова.

Проведенные численные эксперименты дали возможность выявить закономерности приближения характеристик потока в приграничной области к установившемуся режиму течения в горизонтально однородном растительном покрове. Характерной чертой такого процесса является то, что быстрота установления существенно зависит от z . На рис. 3 представлены отношения величины $u(x)$ к скорости на том же уровне, «наблюдаемой» при $x=100$ м, в зависимости от x для растительного покрова с $s=\text{const}=0,05 \text{ см}^{-1}$.

Видно, что величина $\frac{u(x)}{u(100)}$ при малых z изменяется значительно

быстрее по мере углубления в насаждение. Последнее естественно,

так как наибольшее относительное изменение по мере углубления в растительность должна испытать скорость u у поверхности почвы с тем, чтобы уменьшаться до значения, характерного для горизонтально однородного растительного покрова.

На рис. 4 приведено семейство вертикальных профилей безразмерного расстояния $x_{0,9}/h$, на котором величина горизонтальной компоненты скорости принимает значение, равное $0,9u(100)$. Цифры у отдельных кривых означают тип вертикального распределения удельной поверхности растительности.

Вид кривых на рис. 4 еще раз подтверждает уже отмеченный факт, что расстояние установления горизонтально однородного ре-

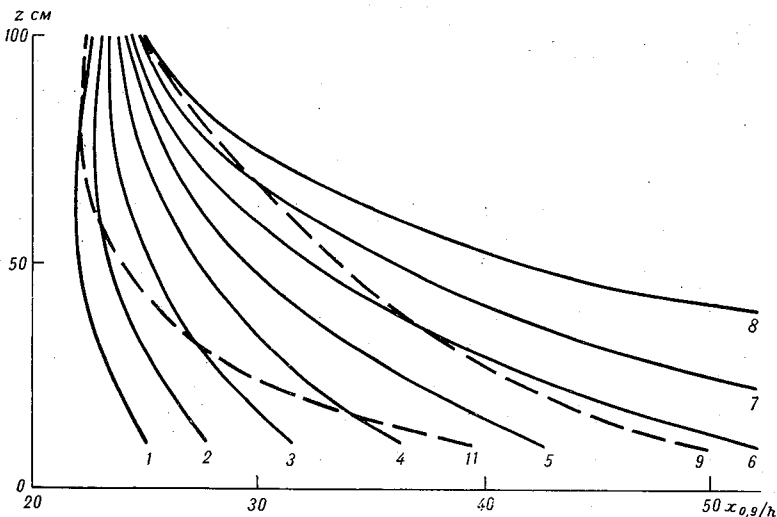


Рис. 4. Зависимость безразмерного расстояния 90%-ного установления величины горизонтальной скорости от высоты и фитометрической структуры растительности.

жима течения сильно зависит от высоты в насаждении, причем эта зависимость различна для растительных покровов разной густоты и вертикальной структуры. Для всех рассмотренных типов распределения $s(z)$ установление величины u происходит быстрее в верхних слоях растительности, и различия в значениях $x_{0,9}/h$, соответствующих верхним и нижним уровням в насаждении, очень сильно растут с увеличением густоты листвы. Так, например, если 90%-ное установление скорости на уровне 50 см в случае $s = \text{const} = 0,01 \text{ см}^{-1}$ достигается при удалении от «опушки» насаждения на расстояние, равное ~ 22 высотам растительности, то при $s = \text{const} = 0,08 \text{ см}^{-1}$ эта величина равна ~ 41 .

Прерывистыми линиями на рис. 4 показаны вертикальные зависимости расстояния 90%-ного установления скорости для приграничного участка горизонтально однородной растительности с деятельной поверхностью, линейно растущей (случай 9) и линейно

убывающей (случай 11), от высоты. Эти зависимости, конечно, не повторяют полностью вида кривых $x_{0,9}(z)/h$ для $s = \text{const}$, однако можно обратить внимание на следующее. Кривые 1 и 11 в верхней своей части изгибаются аналогично — на верхних уровнях в растительном покрове типа 11 густота листы невелика, как и в случае 1; нижняя же часть — «хвост» зависимости $x_{0,9}(z)/h$ — в случае 11 повторяет форму нижней части кривой 8 — книзу в покрове типа 11 густота листы нарастает.

Вместе с этим проведенные численные эксперименты показали, что расстояние 90%-ного установления величины коэффициента турбулентной вязкости k практически не зависит от высоты в насаждении и густоты листы; для всех рассмотренных случаев $s(z)$ величина $x_{0,9}/h$ для коэффициента вихревой вязкости одинакова и равна ~ 24 при всех z .

Очень слабо зависит от высоты в растительности и величины удельной листовой поверхности также и расстояние 90%-ного установления значения интенсивности турбулентности, хотя само это расстояние больше, чем в случае k , и для всех рассмотренных нами $s(z)$ весьма близко к 42 на всех уровнях в растительном покрове. Так, наибольшее различие в значениях этого параметра наблюдается в двух крайних по плотности листы случаях ($s = 0,01 \text{ см}^{-1}$ и $s = 0,08 \text{ см}^{-1}$), когда расстояние 90%-ного установления интенсивности турбулентности равно соответственно ~ 40 и ~ 44 .

Имея в виду рассчитанные закономерности установления горизонтально однородного режима течения в растительном покрове и влияние густоты и вертикального профиля листы на величину $x_{0,9}/h$, необходимо заметить, что при постановке микрометеорологических экспериментов непременно должна учитываться временная динамика фитометрических параметров растительности. Если, например, некоторые результаты микрометеорологических градиентных измерений, полученные в «точке», определенным образом расположенной в насаждении (задано удаление ее от внешней границы растительного покрова), являются репрезентативными и характерны для насаждения в целом на ранней стадии вегетации, то, вообще говоря, за репрезентативность наблюдений, проведенных в этой точке в более поздние сроки, ручаться нельзя.

Малая величина листового индекса растительности в начале вегетационного периода позволяет провести достаточно репрезентативные наблюдения и на довольно малом удалении от границы насаждения. Например, при $s = 0,01 \text{ см}^{-1}$ 90%-ную точность вертикального профиля ветра выше $0,1h$ можно получить, делая измерения на удалении в $25h$ от «опушки», тогда как в фазу максимального развития посева, когда s может достигать величин, равных $0,05$ — $0,06 \text{ см}^{-1}$, такую точность дадут измерения лишь при $x_{0,9} \approx 50h$.

Сказанное относится к простейшему случаю вертикального распределения плотности листы, когда $s(z) = \text{const}$. Временная изменчивость профилей $s(z)$, реализующаяся при конкретных условиях вегетационного развития фитоценозов, может значительно изменить

такого рода оценки. Примером этому служат результаты численных экспериментов с растительностью типов 9—12. В случае ценозов с более сложным вертикальным профилем удельной листовой поверхности для точного определения расстояния установления скорости $x_{0,9}/h$ следует провести специальный расчет по изложенной методике.

Требования к выбору местоположения «точки» для проведения микрометеорологических градиентных наблюдений определяются еще и тем, вертикальная зависимость какой характеристики исследуется. Так, если интерес представляет профиль коэффициента турбулентной вязкости в межлистном пространстве, то можно лишь однажды позаботиться об удалении от границы, обеспечивающем необходимую точность измерения этого профиля: как уже отмечалось, выбрав $x_{0,9} \approx 24h$, мы сможем обеспечить 90%-ную точность измеренного при $z \geq 0,1h$ профиля $k(z)$ во все фазы развития фитоценоза.

В заключение отметим, что изложенная здесь методика может и должна быть развита и применена к исследованию режима течения и в случае горизонтально неоднородной растительности. Далее предполагается систему уравнений динамической трансформации приземного потока растительностью дополнить уравнениями переноса прочих метеорологических субстанций, что дает возможность дополнительно получить многие важные сведения о закономерностях совокупного агрометеорологического режима в растительности любой фитометрической структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менжулин Г. В. К методике расчета метеорологического режима в растительном сообществе.— «Метеорология и гидрология», 1970, № 2, с. 92—99.
2. Циприс И. Б., Менжулин Г. В. Расчет взаимодействия проникаемых ползащитных лесных полос и приземного потока воздуха.— «Метеорология и гидрология», 1972, № 11, с. 82—88.
3. Циприс И. Б. Математическое моделирование агрометеорологического действия лесных ползащитных полос. См. настоящий сборник, с. 51—58.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Г. В. Мен жу ли н. Моделирование метеорологического режима растительного покрова	5
М. Л. А са ту ров. О приложениях теории водно-теплого режима растительного покрова	35
М. Л. А са ту ров, Г. В. Мен жу ли н. К методике экспериментальных агрометеорологических исследований	43
И. Б. Ци пр и с. Математическое моделирование агрометеорологического действия лесных ползащитных полос	51
Г. В. Мен жу ли н, И. Б. Ци пр и с. О закономерностях трансформации приземного потока в растительности	59

Труды ГГО, вып. 318

Моделирование агрометеорологических процессов

Редактор А. Б. Котиковская
Техн. редактор Л. М. Шишкова
Корректор Г. С. Макарова

Сдано в набор 29/I 1974 г. Подписано к печати
20/V 1974 г. М-06289. Формат $60 \times 90^{1/16}$, бумага
тип. № 1. Печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,65. Тираж 710 экз.
Индекс МЛ-259. Заказ 112. Цена 33 коп.
Гидрометеиздат, 199053, Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8
«Союзполиграфпрома» при Государственном
комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

Моделирование метеорологического режима растительного покрова. Менжулин Г. В. Труды ГГО, 1974, вып. 318, с. 5—34.

Статья начинается серию публикаций, посвященных изложению теоретических основ физико-математического моделирования агрометеорологических процессов.

На основе аналитического рассмотрения механизмов динамического, теплового и водного взаимодействия наземной части фитоценоза и потока воздуха в межлистном пространстве сформулирована количественная модель метеорологического режима растительного покрова и выписаны соответствующие уравнения.

Приведены примеры расчета профилей характеристик метеорологического режима фитоценоза, которые доказывают адекватность выводов, следующих из предложенного модельного построения и полученных экспериментальным путем.

Табл. 2. Илл. 9. Библ. 20.

О приложениях теории водно-теплового режима растительного покрова. Асатуров М. Л. Труды ГГО, 1974, вып. 318, с. 35—42.

Рассмотрено приложение выводов, следующих из теоретического описания водно-теплового режима растительного покрова, к модели его газообмена и продуктивности. Проведен детальный анализ зависимости коэффициента устьичной проводимости от суммарного листового индекса. Приведены графики, иллюстрирующие влияние различных факторов, метеорологических и агрофизических, на анализируемую зависимость. Сделан вывод о возможности использования решения «обратной» задачи теории водно-теплового режима растительного покрова при моделировании его режима продуктивности.

Илл. 7. Библ. 9.

К методике экспериментальных агрометеорологических исследований. Асатуров М. Л., Менжулин Г. В. Труды ГГО, 1974, вып. 318, с. 43—50.

Обсуждаются исходные положения и основные выводы моделей метеорологического режима и продуктивности фитоценоза. Делается вывод, что для конкретизации и усугубления практической значимости моделей агрометеорологических процессов существует необходимость верификации выводов из модельных построений.

Сформулированы основные выводы и рекомендации к методике натурных агрометеорологических наблюдений.

Илл. 1. Библ. 9.